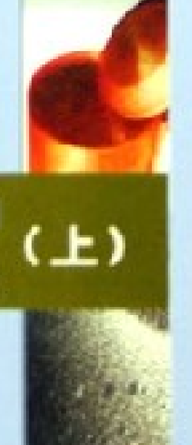
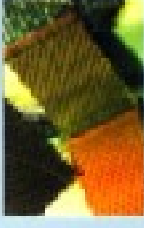
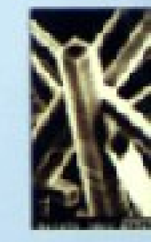
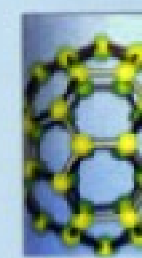
中国材料工程大典

中国机械工程学会　中国材料研究学会

中国材料工程大典编委会



第24卷　材料特种加工成形工程（上）

王至尧　主编

化学工业出版社

CHINA MATERIALS ENGINEERING CANON

中国材料工程大典

中国机械工程学会 中国材料研究学会

中国材料工程大典编委会

第24卷 材料特种加工成形工程（上）

王至尧 主编

（京）新登字039号

内容简介

中国材料工程大典是中国机械工程学会和中国材料研究学会共同组织全国39位院士、百余位各学科带头人、千余位材料工程专家共同执笔编写，全面反映当今国内外材料工程领域发展的最新资料和最新成果，集实用性、先进性和权威性于一体的大型综合性工具书。中国材料工程大典包括材料工程基础、钢铁材料工程、有色金属材料工程、高分子材料工程、无机非金属材料工程、复合材料工程、信息功能材料工程、粉末冶金材料工程、材料热处理工程、材料表面工程、材料铸造成形工程、材料塑性成形工程、材料焊接工程、材料特种加工成形工程、材料表征与检测技术等内容，涵盖了材料工程的各个领域，将最新的实用数据（特别是与国际接轨的标准数据）、图表与先进实用的科研成果系统地集合起来，并附应用实例，充分展示了材料工程各领域的现状和未来。中国材料工程大典不仅可以满足现代企业正确选材、合理用材，应用先进的材料成形加工技术，提高产品质量和性能，降低产品成本，增强产品市场竞争力的需要，而且对推动中国材料科学与材料成形加工技术的不断创新，促进制造业的发展，提高我国制造业的竞争能力，具有重要的现实意义。

本书为第24卷，材料特种加工成形工程（上）。主要内容包括材料电火花成形加工技术、材料数控电火花线切割技术、材料电化学加工技术等。

本书主要供具有大专以上文化水平，从事材料工程研究的工程技术人员在综合研究和处理材料特种加工成形工程的各类技术问题时使用，起备查、提示和启发的作用，也可供研究人员、理工院校的有关师生参考。

图书在版编目（CIP）数据

中国材料工程大典．第24卷，材料特种加工成形工程．上/王至尧主编．—北京：化学工业出版社，2005.8
ISBN 7-5025-7326-7

Ⅰ．中…　Ⅱ．王…　Ⅲ．①材料科学②工程材料－特种加工－成形　Ⅳ．TB3

中国版本图书馆CIP数据核字（2005）第094411号

中国材料工程大典
第24卷
材料特种加工成形工程（上）
中国机械工程学会
中国材料研究学会
中国材料工程大典编委会
王至尧　主编
责任编辑：周国庆　陈志良　李骏带
责任校对：陶燕华
封面设计：雷嘉琦
*
化学工业出版社出版发行
（北京市朝阳区惠新里3号　邮政编码100029）
购书咨询：（010）64982530
（010）64918013
购书传真：（010）64982630
http://www.cip.com.cn
*
新华书店北京发行所经销
北京蓝海印刷有限公司印装
开本880mm×1230mm　1/16　印张37　字数1703千字
2006年1月第1版　2006年1月北京第1次印刷
ISBN 7-5025-7326-7
定　价：120.00元

序

材料是当代社会经济发展的物质基础，也是制造业发展的基础和重要保障。进入21世纪以来，随着经济全球化的发展和中国的崛起，现代制造业的重心正不断向中国转移。据统计，今天中国制造业直接创造国民生产总值的1/3以上，约占全国工业生产的4/5，为国家财政提供1/3以上的收入，占出口总额的90%。但是与发达国家相比，我国制造业的水平不高、自主创新能力不足、高端市场竞争力还不强。我国虽然已是世界制造业大国，但还不是世界制造业强国。在有关因素中，材料工程基础薄弱是制约我国制造业发展的关键因素。广义的材料工程包括材料制备、测试和加工成形过程。为了提高我国制造业的水平和竞争力，突破材料工程这个薄弱环节，中国机械工程学会和中国材料研究学会牵头，会同中国金属学会、中国化工学会、中国硅酸盐学会、中国有色金属学会、中国复合材料学会共同组织编撰《中国材料工程大典》（简称《材料大典》），其目的是力图为我国制造业提供一部集科学性、先进性和实用性于一体的综合性专业工具书。以满足广大科技工作者的迫切需求，为科技自主创新和我国制造业的崛起加强技术基础。

经过5年多的艰苦努力，《材料大典》终将出版了。这部共26卷约7000万字的巨著，是39位两院院士和1200余位参编专家教授们辛勤劳动的智慧结晶。有的作者为此牺牲了健康，如一位退休了的总工程师，为了把他多年的研究成果和实践经验写成书稿，由于长时间写作，导致眼睛视网膜脱落……。这种敬业精神与坚强毅力是值得我们学习铭记的。借此机会，我们要感谢中国金属学会、中国化工学会、中国硅酸盐学会、中国有色金属学会、中国复合材料学会的支持。这些学会的众多专家教授积极参与了《材料大典》编写工作，与中国机械工程学会和中国材料研究学会的专家教授一起完成这项艰巨任务，从而使《材料大典》在完整性与先进性、科学性与实用性的结合上得到了加强；我们要感谢科学技术部、国防科学技术工业委员会、国家自然科学基金委员会、中国科学技术协会、中国科学院、中国工程院，以及各协作单位对编写工作的大力支持和积极帮助；我们也要感谢师昌绪院士等顾问的殷切指导，他们在编委会的两次工作会议上提出了许多重要的意见和建议，平时也给予了经常关心和指导，使我们少走了许多弯路；我们还要对关心和支持《材料大典》编写工作的科研院所、院校、企业以及有关人员表示感谢。没有大家的支持与协同，就不可能有《材料大典》的成功编写和顺利出版。

《材料大典》既总结了10多年来在材料工程方面的最新数据、图表及科研成果，还汇集了国内外在材料工程方面的成熟经验和先进理念，它体现了科学性、先进性和实用性的结合。可供具有大专以上文化水平的有关工程技术人员查阅使用，也可供理工院校的师生参考。

编撰《材料大典》涉及范围广，难度大，书中不可避免地会存在一些缺点和不足之处，恳请各位读者指正。

中国机械工程学会理事长
中国材料工程大典编委会主任

2005年9月23日

前　　言

《材料特种加工成形工程》为《中国材料工程大典》中的卷目之一。

材料特种加工成形是制造业材料成形的主要组成部分，是航天、航空、电子、兵器、船舶、汽车、电力、钢铁、石化、装备等支柱产业零部件加工的主要手段之一，涵盖了现代制造业中去除成形加工、受迫成形加工、离散-堆积成形加工、生长成形、极端制造等加工方法。

中国目前已成为材料特种加工成形大国。进入 21 世纪，中国的材料特种加工成形迎来了持续发展的大好局面，同时也面临着国外制造强国高品位、高精度、高自动化、高智能化等严峻挑战。只有向世界先进水平看齐，提高整体集成技术和创新水平，中国的材料特种加工才能在世界市场激烈的竞争中发扬优势，这也是技术人员面临的紧迫和艰巨的任务。《中国材料工程大典》中《材料特种加工成形工程》是在此形势和任务需求条件下编写出版的。

《材料特种加工成形工程》中是国机械工程学会特种加工分会首次组织编写的，是迄今为止篇幅最大、涵盖内容最新、最全的材料特种加工专业工具书。本书内容包括概论、材料电火花成形加工技术、材料数控电火花线切割技术、材料电化学加工技术、材料高能束流加工技术、快速原型与快速制造、电加工机床质量控制与检测等 7 篇约 400 万字。参加本书编写的有全国著名制造企业、研究所和大学等各方面专家教授共 50 余名。参加编写的主要单位有北京控制工程研究所、清华大学、上海交通大学、哈尔滨工业大学、南京航空航天大学、北京航空制造工程研究所、苏州电加工机床研究所、苏州三光科技集团、上海同济大学、大连理工大学、西北工业大学、江苏镇江大学、首都航天机械公司等。由王至尧负责统稿。编写工作历时 4 年完成。

各篇的主编分别如下:

第 1 篇　概论	齐从谦
第 2 篇　材料电火花成形加工技术	刘晋春　白基成　郭永丰
第 3 篇　材料数控电火花线切割技术	李明辉
第 4 篇　材料电化学加工技术	徐家文
第 5 篇　材料高能束流加工技术	王亚军
第 6 篇　快速原型与快速制造	颜永年
第 7 篇　电加工机床质量控制与检测	连克仁

本书全面、系统地反映了我国材料特种加工成形的成就与经验，介绍了国内外材料特种加工的先进技术和研究动向，具有较强的“科学性、先进性和实用性”。在编写过程中强调以“全而精、新而准、实用便查”为特点，在整体设计上既立足全局，又突出重点。从材料特种加工成形的科学基础、加工工艺与设备、生产质量管理与检测，以及国内外最新技术应用等方面作了全方位论述；在取材上以“基础、通用、先进、实用”应用工程化为原则。其中第 6 篇快速原型与快速制造篇部分章节由美国卡布雷教授（Dr. J. Keverian）参与了编写，并提供相关资料，在此表示感谢。

本书主要供从事材料特种加工成形科技人员查阅使用，也可供研究人员、管理人员和高等院校师生参考。

感谢中国机械工程学会、中国材料研究学会和中国材料工程大典编委会对本卷编写工作的指导与大力支持。由于编写时间紧迫和编者水平有限，不当之处在所难免，恳请读者指正。

王至尧

2005 年 10 月 6 日

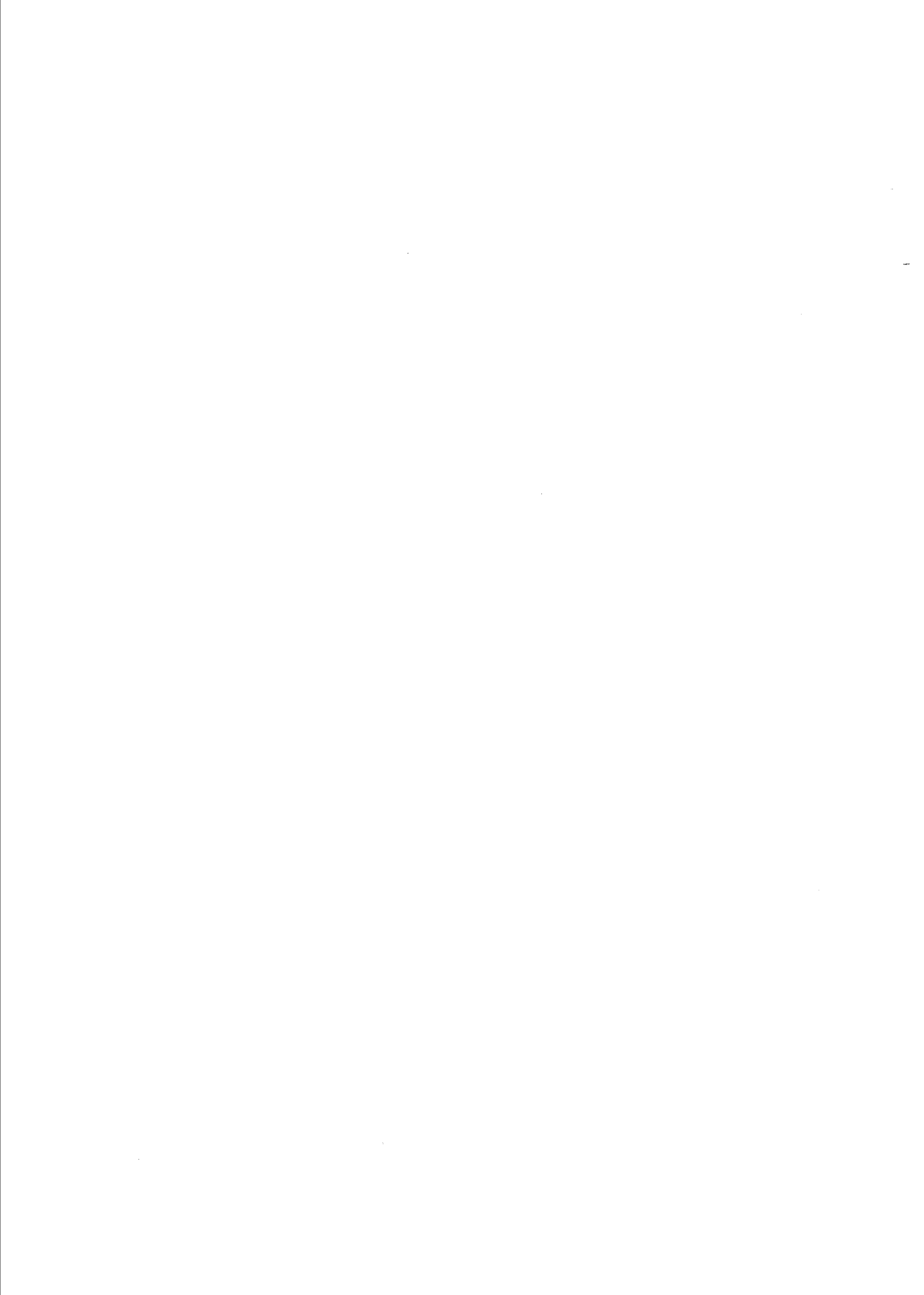
目　录

第1篇

概 论

主 编 齐从谦
主 审 王至尧
编 写 齐从谦 王至尧
审 稿 中国材料工程大典编委会

中国机械工程学会
中国材料研究学会
中国材料工程大典编委会



第 1 章　材料特种加工及其在现代制造业中的作用

1　特种加工的定义和特点

1.1　特种加工的定义

人们熟悉的传统机械加工方法（traditional machining），大都是在机械力的作用下，用比被加工材料还要硬的工具将工件材料去除、让其变形或改变其性能，使其达到所需要的形状尺寸和表面质量要求。

随着社会的进步和科学技术的不断发展，人们对社会产品的需求也越来越高。不仅产品更新换代的速度加快，而且还要求产品具有很高的强度重量比和性能价格比，使产品向高速度、高精度、高可靠性、高耐磨性、耐腐蚀性、耐高温高压以及尺寸更大或更小的两极分化方向发展。为此，各种新材料、新结构以及形状复杂和微细结构的机械零件大量涌现，给机械制造业提出了一系列亟待解决的难题。例如，各种难切削材料的加工；各种结构形状复杂、尺寸或微小或特大、精密零件的加工；薄壁、弹性元件、等刚度及特殊零件的加工等。对此，采用传统加工方法十分困难，甚至无法加工。于是，人们一方面千方百计来完善和发展传统机械加工技术，另一方面则借助于科学技术的发展，创立有别于传统机械加工的特种加工方法。

所谓特种加工方法（non-traditional machining），有时也称为非传统加工方法，是指那些在加工过程中不需要比工件更硬的工具，也不需要在加工过程中施加明显的机械力，而是直接利用电能、热能、磁能、电化学能、化学能、声能、光能等或者是它们的组合，使工件材料被去除、变形、改变性能、表面涂覆与堆积，使其达到所需的形状尺寸和表面质量要求的各种加工方法的总称。

特种加工是随着科学技术的发展而不断产生和发展的一类新型加工方法。目前已成功开发应用的就有 100 余种，其中主要有电火花加工（电火花成形加工、电火花线切割加工等）、电化学加工（电解加工、电化学抛光、电铸等）、化学加工（化学铣削加工、照相腐蚀、光刻腐蚀等）、高能束流加工（电子束加工、离子束加工、激光加工、高压流体喷射加工等）、电磁成形、超声波加工、快速原型（RP）等。

1.2　特种加工的特点

特种加工是直接利用电能、热能、磁能、电化学能、化学能、声能、光能以及某些特殊机械能等多种能量或它们的组合实现加工的，在加工机理和方式上与传统的机械加工有很多本质上的不同，并有着非常鲜明的特点和特色。

1）与材料力学性能无关　特种加工方法主要不是靠机械能加工，而是直接利用电能、热能、磁能、电化学能、化学能、声能、光能进行加工，所以与工件材料的硬度和强度等力学性能无关。加上它的能量密度很高（参见表 1.1-1），适用于高熔点、高强度、高耐热、耐腐蚀、特殊性能的金属和非金属材料，加工范围甚广。

表 1.1-1　各种加工方法的能量密度

平均能量密度 /W·cm^{-2}	特种加工方法	传统机械加工方法
10^8	激光加工	
10^7	电子束加工	
10^6	电火花成形加工/电火花线切割加工 电火花磨削 阳极机械切削 微波加工 高压接触加工 电解放电加工	超高速切削加工 冲击推出加工 超声波成形
10^5	放电高速流体加工 高压（水）喷射加工 放电镀覆 超声波加工/超声波空化作用加工 放电烧结/放电冲击烧结 放电冲击镀覆/放电冲击压焊 等离子束加工	熔融加工
10^4	电磁成形 放电冲击成形 放电高压处理 电解磨削 放电电解加热加工/放电电解扩散加工	喷射加工压焊
10^3	离子束加工	切削加工
10^2	高速电铸	
10^1	不良导体加工	磨光、抛光、研磨

2）工具与工件不直接接触　特种加工的工具与工件在加工过程中一般都不直接接触，有的甚至不需要工具。因此工件一般不承受明显的机械力。这不仅有助于实现以柔克刚，而且有利于加工那些不能承受机械力作用的薄壁零件或弹性零件，更适合于各种微细零件的加工及纳米级零件的加工。

3）便于加工复杂型面　很多特种加工方法只需以简单的进给运动，就可以加工出各种复杂的三维曲面，所以特种加工现已成为复杂型面的主要加工方法之一。

4）可以获得良好的表面质量　在特种加工工程中，由于工件表面不像切削加工那样产生强烈的弹、塑性变形，故许多特种加工方法都可以获得非常小的表面粗糙度，其残余应力、冷作硬化、热应力、热影响区及毛刺等表面缺陷均比传统机械加工小很多。

5）利用多种特种加工方法的复合应用　一些特种加工方法能够复合应用，形成扬长补短的新型工艺方法，更突出其优越性，获得更好的综合加工效果，也便于推广应用。

2 特种加工的产生和发展

2.1 特种加工的产生

传统的机械加工对人类的生产和物质文明起到了极大的推动作用。例如18世纪70年代就发明了蒸汽机，但由于当时制造不出高精度的蒸汽机汽缸，无法推广应用。直到有人创造出和改进了汽缸镗床，解决了蒸汽机主要部件的加工工艺，才使蒸汽机获得广泛应用，并进一步导致了世界性的第一次工业革命。

然而，从第一次产业革命以来，一直到第二次世界大战以前，在这段长达150多年的漫长年代里，制造行业基本上都是靠机械切削加工（包括磨削加工）来达到加工目的。人们的思想一直仍还局限在自古以来传统的用机械能量和切削力来去除多余的金属，以达到加工的要求。

随着科学技术的发展，人们发现并认识到放电时会产生大量的热，可以使金属瞬时熔化和汽化，到19世纪末，美国科学家发明了用低压大电流施于加工电极与工件之间的方法来刻印文字和花纹；20世纪初，人们又发现在介电液中放电时会产生金属粉末；1943年，前苏联学者拉扎林柯夫妇则利用放电时的电腐蚀现象进行尺寸加工，从而开创和发明了电火花加工方法，用铜棒在淬火钢上加工出小孔，可用软的工具加工任何硬度的金属材料，首次在传统的切削加工方法之外，直接利用电能和热能来去除金属，获得“以柔克刚”的效果。

第二次世界大战之后，特别是20世纪50年代以来，随着生产的发展和科学实验的需要，很多工业部门，尤其是国防工业部门要求尖端科学技术产品向高精度、高速度、高温、高压、大功率、小型化等方向发展，所使用的材料愈来愈难加工，零件形状愈来愈复杂，表面精度、粗糙度和某些特殊要求也愈来愈高，对机械制造和材料加工成形提出了一系列新的要求。

1）解决各种难加工材料的加工问题　如硬质合金、钛合金、耐热钢、不锈钢、淬火钢、金刚石、宝石、石英以及锗、硅等各种高硬度、高强度、高韧度、高脆性的金属及非金属材料的加工。

2）解决各种特殊复杂表面的加工问题　如喷气涡轮机叶片和锻压模的立体成形表面，各种冲模冷拔模上特殊断面的型孔，喷油嘴、栅网、喷丝头上的小孔窄缝等的加工。

3）解决各种具有特殊要求的零件的加工问题　如对表面质量和精度要求很高的细长零件、薄壁零件、弹性元件等低刚度零件的加工。

要解决上述一系列工艺问题，仅仅依靠传统的加工方法和切削工艺就很难实现，甚至根本就无法实现。因此社会与生产的发展，引发了对新的加工方法的需求。人们相继探索研究新的加工方法，如何用软的工具加工硬的材料（例如，用石墨来加工钢材），不仅用机械能而且还采用电、化学、光、声等能量来进行加工，促进了特种加工的高速发展，并在各行各业得到了越来越广泛的应用。目前，我国各类特种加工设备的年产量已超过5万余台，年产值达20亿元人民币。特种加工成为我国制造业中一个不可缺少的重要组成部分。

当然，与其他制造学科技术的发展一样，特种加工的领域和内涵也是在其自身发展过程中不断扩展和延拓的。早期的特种加工主要是指电火花成形加工、电火花线电极切割加工和电解加工，而后者还兼具有电化学加工的含义。随着电加工技术在制造业得到越来越广泛的应用，尤其是在模具制造行业中发挥了举足轻重的作用，逐渐形成了一门独立的技术学科，并衍生出一系列具有与电加工的“以柔克刚”、“以软制硬”性能相类似的材料成形加工方法，如电子束加工、离子束加工、高能束加工、电磁成形、超声波加工、水力加工、液力加工、激光加工及等离子加工等材料成形加工方式。显然，这些新的而且又区别于传统切削加工的材料成形加工技术已经大大超出了“电加工”的范围。于是，人们把以上这些在材料成形加工机理上有别于传统切削加工的材料成形加工方法统成为“特种加工”。特种加工在其技术上、学术上和方法上的内涵和外延都得到了进一步的拓展，并逐渐形成特种加工学科的系统性、先进性、新颖性、集成性、信息化等鲜明的特色。

2.2 增材加工——特种加工的新进展

上面所说的两类加工方法有一个共同之处，即都是通过在工件上“去除”材料的方式来达到成形加工的目的，这就是通常所说的“减材加工”。

随着制造科学与技术、材料科学与技术的不断发展，并与信息科学技术的紧密结合，又产生了一种在成形方式上与前两类加工完全相反的特种加工类型——“增材加工”。

所谓“增材加工”是指采用从无到有、层层堆积的方法来达到材料成形的目的。这种加工方式在材料成形加工的理念上是对“减材加工”的突破，在技术上是一种创新，在控制方法上需要信息技术的支持，在材料使用上则是更明显优于“减材加工”。它所需要的材料仅仅取决于工件最终的几何形状和尺寸，而不像“减材加工”那样，把原始毛坯上多余的材料去除，被去除的材料往往就成了没有价值的废料（如铁屑、磨粒等）。

增材成形加工主要有电镀、电铸、电火花强化、等离子渗透及激光快速成形等类型，其典型代表是“激光快速成形”。其基本原理来自快速原型技术。

（1）快速原型技术的原理

快速原型技术（Rapid Prototyping Technology，RP）是国外20世纪80年代中后期发展起来的一种通过特殊加工工艺实现设计物理模型的新技术。RP系统依据三维CAD模型数据、CT和MRI扫描数据和由三维实物数字化系统创建的数据，通过各种使能方法，把液体、粉末或者薄片等形态的材料堆积起来制造物理实物。它与虚拟制造技术（Virtual Manufacturing）一起，被称为未来制造业的两大支柱技术。快速原型技术对缩短新产品开发周期，降低开发费用具有极其重要的意义，有人称快速原型技术是继NC技术后制造业的又一次革命。目前RP技术已成为各国制造科学研究的前沿学科和研究焦点。

快速原型技术是综合利用CAD技术、数控技术、激光加工技术和材料技术实现从零件设计到三维实体原型制造一体化的系统技术。它采用软件离散-材料堆积的原理实现零件的成形，如图1.1-1所示。

其具体过程如下：首先利用高性能的CAD软件设计出零件的三维曲面或实体模型；再根据工艺要求，按照一定的厚度在Z向（或其他方向）对生成的CAD模型进行切面分层，生成各个棱面的二维平面信息；然后对层面信息进行工艺处理，选择加工参数，系统自动生成“工具”移动轨迹和数控加工代码；再对加工过程进行仿真，确认数控代码的正确性；然后利用数控装置精确控制激光束或其他工具的运动，在三维环境下的当前工作层上采用轮廓扫描，把材料加工出适当的截面形状；然后再铺上一层新的成形材料，进行下一次的加工，直至整个零件加工完毕。可以看出，快速原型技术是个由三维转换成二维（软件离散化），再由二维到三维（材料堆积）的工作过程。

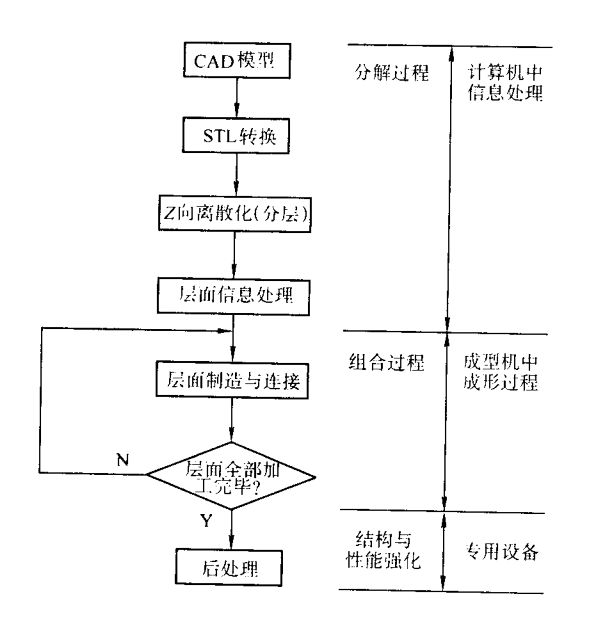


图1.1-1 快速原型工作原理

快速原型方法不仅可用于原始设计中快速生成零件的实物，也可与反求工程相结合，用来快速复制实物（包括放大、缩小、修改和复制）。其工作过程是：用三维数字化仪采集产品或零件的三维实体信息，在计算机中通过CAD建模技术再还原生成实物的三维模型，必要时还可以用三维CAD软件对重建的CAD模型进行修改和缩放，然后采用专门的软件进行三维离散化，以生成STL格式的文件，再传送到快速成型机中生成实体产品或零件。

激光快速成形技术的主要工艺方法有以下几种：

1）光固化立体造型（Stereo Lithography Apparatus，SLA）；

2）分层物件制造（Laminated Object Manufacturing，LOM）；

3）选择性激光烧结（Selective Laser Sintering，SLS）；

4）熔融沉积造型（Fused Deposition Modeling，FDM）。

直接利用RP工艺，结合相应的后处理工艺或快速精密铸造工艺不仅可以快速制造出各种形状复杂的零件，还可以直接实现模具的快速制造。其主要方法有：

1）直接生成金属模具零件的方法　利用金属粉末烧结（SLS）制成的原型件，直接进行金属熔渗处理，形成金属模具零件。

2）直接生成非金属模具零件的方法　利用SLA、FDM或LOM方法，直接制造树脂、ABS塑料模具零件。

3）直接生成消失模的方法　用SLS方法直接制造铸造用的消失蜡模，实现零件的快速精密铸造。

基于RP原型件，结合相应的特种加工工艺，可以间接实现模具制造：

1）基于RP原型，与电铸工艺、金属喷涂、陶瓷涂覆工艺相结合，快速制造金属或陶瓷模具的工艺技术。

2）基于RP原型，浇注硅橡胶、环氧树脂或聚氨酯等软材料，直接制造软模具。

基于RP原型，结合相应的特种加工工艺，快速制造电加工的电极，实现复杂模具零件的快速电火花成形加工。

1）在原型或原型制作的母模上刷涂导电层，再电铸或电镀形成金属电极。

2）直接在原型上进行金属冷喷涂形成金属电极。

3）利用原型制造母模，充实粉末，再压实烧结形成电极。

4）在原型制作的母模内充入石墨粉与黏结剂的混合物，固化形成石墨电极。

5）在原型制作的母模内充入环氧树脂与碳化硅粉的混合物，首先形成研磨模，再在专用振动研磨机上研磨出石墨电极。

（2）快速原型和激光快速成型技术的特点

快速原型和激光快速成型技术作为材料成型特种加工的一种非常有效的工艺方法，具有一系列显著的特点和技术优势：

1）更适合于形状复杂的、不规则零件的加工；

2）减少了对熟练技术工人的需求；

3）没有或极少废弃材料，是一种环保型制造技术；

4）成功地解决了计算机辅助设计中三维造型“看得见，摸不着”的问题；

5）系统柔性高，只需修改CAD模型就可生成各种不同形状的零件；

6）技术集成，设计制造一体化；

7）具有广泛的材料适应性；

8）不需要专用的工装夹具和模具，大大缩短了新产品试制时间；

9）零件的复杂程度与制造成本关系不大。

以上特点决定了快速原型法主要适合于新产品开发、快速单件及小批量零件制造、复杂形状零件的制造、模具设计与制造，也适合于难加工材料的制造、外形设计检查、装配检验和快速反求工程等。

关于快速原型和激光快速成形技术的具体内容，将在本书有关章节中予以详细介绍。

3 特种加工的分类及工艺性能比较

3.1 特种加工的分类

材料成型特种加工的分类可以按能量来源和作用原理分为如下几大类。

1）电、热类　有电火花加工（其中包括电火花成型和电火花线切割加工）、电子束加工及等离子加工。

2）电、机械类　有离子束加工、高能束加工。

3）电化学类　有电解加工、电刷镀加工、电铸等。

4）电化学、机械类　有电解磨削、阳极机械磨削加工等。

5）声、机械类　有超声加工。

6）光、热类　有激光加工、激光快速成型。

7）化学类　有化学加工（化学铣削、照相腐蚀、光刻）。

8）液流类　有高压（水）喷射加工、液力加工。

9）液体、机械类　有磨料流动加工、磨料喷射加工。

这里应该说明的是，特种加工虽然在本质上与传统的机械加工有所不同，但并不排斥常规的机械加工，二者之间可以相互补充。特种加工在其发展过程中具有特种加工和常规机械加工的双重特点，从而形成了某些过渡性的工艺，往往是介乎二者之间的加工工艺和方法。例如在切削过程中引入超声振动或低频振动切削；在切削过程中通以低电压大电流的导电切削、加热切削以及低温切削等。这些加工方法是在传统的切削加工的基础上发展起来的，目的是改善切削条件，提高切削效率，虽然在本质上还属于切削加工，但已融入了特种加工的理念。

在特种加工范围内还有一些属于改善表面粗糙度或表面性能的加工工艺，前者如电解抛光、化学抛光、离子束抛光等；后者如电火花表面强化、镀覆、刻字、电子束曝光、离子束注入掺杂等。

随着半导体大规模和超大规模集成电路芯片生产发展的

需要，上面提到的电子束、离子束加工，就是最近十年来提出的超微量加工、纳米级加工，即在物理上达到所谓分子、原子单位的加工。

此外，特种加工还包括一些不属于尺寸加工的成形加工方式，如液中放电成形加工、电磁成形加工、爆炸成形加工及放电烧结加工等等。

表1.1-2所示为按照能量和作用形式分类的各种特种加工方法。

表1.1-2　材料成形特种加工分类

加工方法		主要能量形式	作用形式	英文缩写
电火花加工	电火花成形加工	电、热能	熔化、气化	EDM
	电火花线切割加工	电、热能	熔化、气化	WEDM
电化学加工	电解加工	电化学能	离子转移	ECM
	电铸加工	电化学能	离子转移	
	涂镀加工	电化学能	离子转移	
高能束加工	激光束加工（含RP）	光、热能	熔化、气化	RP/LBM
	电子束加工	电、热能	熔化、气化	EBM
	离子束加工	电、机械能	切蚀	IBM
	等离子弧加工	电、热能	熔化、气化	PAM（C）
物料切蚀加工	超声加工	声、机械能	切蚀	USM
	磨料流加工	机械能	切蚀	AFM
	液体喷射加工	机械能	切蚀	HDM
化学加工	化学铣切加工	化学能	腐蚀	CHM
	照相制版加工	化学、光能	腐蚀	
	光刻加工	光、化学能	光化学、腐蚀	PCM
	光电成形电镀	光、化学能	光化学、腐蚀	
	刻蚀加工	化学能	腐蚀	
	粘接	化学能	化学键	
	爆炸加工	化学、机械能	爆炸	
成形加工	粉末冶金	热、机械能	热压成形	PM
	超塑成形	机械能	超塑性	SPM
	快速成形	热、机械能	热熔化成形	RPM
复合加工	电化学电弧加工	电化学能	熔化、气化腐蚀	ECAM
	电解电火花机械磨削	电、热能	离子转移、熔化、切削	MEEC
	电化学腐蚀加工	电化学、热能	熔化、气化腐蚀	ECE
	超声放电加工	声、热、电能	熔化、切蚀	
	复合电解加工	电化学、机械能	切蚀	
	复合切削加工	机械、声、磁能	切削	

还可以从学科的角度来对特种加工进行分类。例如世界电加工学会和中国机械工程学会特种加工分会就把特种加工分为如下五个专业委员会：

1）电火花成形加工；
2）电火花线切割加工；
3）电解成形加工；
4）三束（电子束、高能束及等离子束）加工；
5）激光快速成形加工。

这些专业委员会每年都围绕着各自的专题举办各种形式的研讨会、学术交流会，开展学术交流和成果展示及应用推广工作，各专业委员会之间既有分工，又有学术上的交叉、交流和协作。

特种加工技术和工艺还可以用于石油钻井工程。钻井实质上就是破碎岩石，并从井下排除岩屑的过程。在石油钻井中当前主要沿用钻头加压旋转切削或疲劳破坏的传统方法来破碎岩石。其破岩速度慢，尤其是破硬岩时更慢。然而，现代石油工业对钻井速度、深度和油井走向等方面要求越来越高，如目前钻井深度已超过一万米，为增强采油效率，有时还有在打好的竖井下再打一段水平井。所有这些都使得现有钻头旋转钻井工艺难以应付，并导致转盘钻井机械及设备愈来愈庞大和复杂。为此，近年来人们一直在试图利用现代科技的最新成就，开辟新的钻井方法。新的钻井方法大致可分为四类：①采用电弧法或激光法将岩石加热到1 100～2 200℃以上使之熔化或气化；②热膨胀法，它是把岩石加热到370～600℃，此时所产生的热应力使岩石表面呈片状剥落，可采用电解法、强制火焰法达到这一目的；③化学腐蚀

法，即使用高度活性的化学剂（如氟）来蚀除岩石，称氟钻井法；④机械诱导应力法，它是利用瞬时冲击作用产生的强大冲击力来破碎岩石，如高压水射流法、爆炸法等。

上述几种新的钻井方法大都吸收了特种加工在现代制造业和材料成型中的成功经验，其共同特点是抛弃了传统的钻头加压旋转切削破岩的原理。由此可见，特种加工工艺和方法在很多领域内是大有用武之地的。

3.2　特种加工工艺性能比较

1）电火花加工　电火花加工是通过工件和工具电极间的放电而有控制地去除工件材料，以及使材料变形、改变性能或被镀覆的特种加工。其中成形加工适用于各种孔、槽、模具，还可用于刻字、表面强化、涂覆等；切割加工适用于各种冲模、粉末冶金模及工件，各种样板、磁钢及硅钢片的冲片，钼、钨、半导体或贵重金属。

2）电化学加工　电化学加工是通过电化学反应去除工件材料或在其上镀覆金属材料等的特种加工。其中电解加工适用于深孔、型孔、型腔、型面、倒角去毛刺、抛光等。电铸加工适用于形状复杂、精度高的空心零件，如波导管；注塑用的模具、薄壁零件；复制精密的表面轮廓；表面粗糙度样板、反光镜、表盘等零件。涂覆加工可针对表面磨损、划伤、锈蚀的零件进行涂覆以恢复尺寸；对尺寸超差产品进行涂覆补救。对大型、复杂、小批工件表面的局部镀防腐层、耐腐层，以改善表面性能。

3）高能束加工　高能束加工是利用能量密度很高的激光束、电子束或离子束等去除工件材料的特种加工方法的总称。其中激光束加工主要应用有打孔、切割、焊接、金属表面的激光强化和微调等。电子束加工有热型和非热型两种。热型加工是利用电子束将材料的局部加热至熔化或汽化点进行加工的，适合打孔、切割槽缝、焊接及其他深结构的微细加工；非热型加工是利用电子束的化学效应进行刻蚀、大面积薄层等微细加工等。离子束加工主要应用于微细加工、溅射加工和注入加工。等离子弧加工适用于各种金属材料的切割、焊接、热处理，也可制造高纯度氧化铝、氧化硅和工件表面强化，还可进行等离子弧堆焊及喷涂。

4）超声加工　超声加工是利用超声振动的工具在有磨料的液体介质中或干磨料中，产生磨料的冲击、抛光、液压冲击及由此产生的气蚀作用来去除材料，以及超声振动使工件相互结合的加工方法。超声加工适用于成形加工、切割加工、焊接加工和超声清洗。

5）液体喷射加工　液体喷射加工是利用水或在水中加添加剂的液体，经水泵及增压器产生高速液体束流，喷射到工件表面，从而达到去除材料的目的，可加工薄、软的金属及非金属材料，去除腔体零件内部毛刺，使金属表面产生塑性变形。磨料喷射加工适用于去毛刺加工、表面清理、切割加工、雕刻、落料及打孔等。

6）化学加工　化学加工是利用化学溶液与金属产生化学反应，使金属腐蚀溶解，改变工件形状、尺寸的加工方法。化学加工用于去除材料表层，以减重；有选择地加工较浅或较深的空腔及凹槽；对板材、片材、成形零件及挤压成形零件进行锥孔加工。

7）复合加工　复合加工是指同时在加工部位上组合两种或两种以上的不同类型能量去除工件材料的特种加工。

尽管特种加工优点突出，应用日益广泛，但是各种特种加工方法的能量来源、作用形式、工艺特点却不尽相同，其加工特点与应用范围自然也不一样，而且各自还具有一定的局限性。为了更好地应用和发挥各种特种加工的最佳功能及效果，必须依据工件材料、尺寸、形状、精度、生产率、经济性等情况作具体分析，区别对待，合理选择特种加工方法。

表 1.1-3 所示为材料成形特种加工领域内各种加工方法的综合比较。

表 1.1-3　材料成形特种加工领域内各种加工方法的综合比较

<table>
<tr><th>加工方法</th><th>可加工材料</th><th>工具损耗率
/%
最低/平均</th><th>材料去除率
/mm³·min⁻¹
平均/最高</th><th>可达到尺寸
精度/mm
平均/最高</th><th>可达到表面粗糙度 R_a/μm
平均/最低</th><th>主要适用范围</th></tr>
<tr><td>电火花
成形加工</td><td rowspan="8">任何导电的金属材料。如：硬质合金、耐热钢、不锈钢、淬火钢、及钛合金等</td><td>0.1/10</td><td>30/3 000</td><td>0.03/0.003</td><td>10/0.04</td><td>从数微米的孔、槽到数米的超大型模具、工件等</td></tr>
<tr><td>电火花
线切割加工</td><td>较小
（可补偿）</td><td>40/325①
$mm^2 \cdot min^{-1}$</td><td>0.02/0.002</td><td>5/0.32</td><td>切割各种冲模、塑料模、粉末冶金等二维及三维直纹面</td></tr>
<tr><td>电解加工</td><td>不损耗</td><td>100/1 000</td><td>0.1/0.01</td><td>1.25/0.16</td><td>从细小零件到上吨重的超大型工件及模具</td></tr>
<tr><td>电解磨削</td><td>1/50</td><td>1/100</td><td>0.02/0.001</td><td>1.25/0.04</td><td>硬质合金等难加工材料的磨削，如硬质合金工具、轧辊</td></tr>
<tr><td>超声加工</td><td>任何脆性材料</td><td>0.1/10</td><td>1/50</td><td>0.63/0.005</td><td>加工切割脆硬材料，如玻璃、石英、宝石、金刚石等</td></tr>
<tr><td>激光加工</td><td rowspan="3">任何材料</td><td rowspan="3">不损耗（三束加工无成型工具）</td><td rowspan="3">瞬时去除率很高，受功率限制，平均去除率很低②</td><td rowspan="2">10/1.25</td><td>精密小孔、窄缝及成型切割、刻蚀，还可进行焊接、热处理</td></tr>
<tr><td>电子束加工</td><td>在各种难加工材料上打微孔、切缝、蚀刻，曝光以及焊接等</td></tr>
<tr><td>离子束加工</td><td>/0.01</td><td>对零件表面进行超精密、超微量加工、抛光、刻蚀、掺杂等</td></tr>
</table>

① 线切割加工的金属去除率按惯例均用 mm^2/min 为单位。

② 这类工艺主要用于精微和超精微加工，不宜单纯比较材料去除率。

编写：齐从谦（同济大学）

第2章　材料特种加工成形工程的特点与要求

1　特种加工对结构工艺性等的影响

各种特种加工工艺逐渐广泛的应用，引起了材料成形和机械制造工艺技术领域内的许多变革。

1）改变了零件的典型工艺路线。以往，除磨削外，其他切削加工、成形加工等都必须安排在淬火热处理工序之前，这是一项工艺人员绝不可违反的工艺准则。特种加工的出现，改变了这种一成不变的程序格式。由于它基本上不受工件硬度的影响，而且为了免除加工后淬火引起热处理变形，一般都先淬火而后加工。最为典型的是电火花线切割加工、电火花成形加工和电解加工等。

特种加工的出现还对工序的“分散”和“集中”原则产生了影响。以加工齿轮、连杆的型腔锻模为例，由于采用特种成型加工时没有显著的切削力，机床、夹具、工具的强度、刚度不是主要矛盾。因此，即使是较大的、复杂的加工表面，也能采用一个复杂的工具、简单的运动轨迹，经一次安装、一道工序加工出来，工序比较集中，显著地节省了辅助时间。

2）试制新产品时，采用电火花加工、电解加工或激光快速成形技术，可以直接加工出各种标准和非标准直齿轮(包括非圆齿轮、非渐开线齿轮)、微电机定子、转子硅钢片、变压器铁心，各种特殊、复杂的二次曲面体零件及任意复杂的三维零件外形、型腔。可以省去设计和制造相应的刀具、夹具、量具、模具及二次工具，大大缩短了试制周期。

3）特种加工对产品零件的结构设计带来很大的影响。例如花键孔、轴、枪炮膛线的齿根部分，从设计的观点出发，为了减少应力集中，最好做成小圆角，但拉削加工时，刀齿做成圆角对排屑就非常不利，容易造成磨损，只能设计与制造成清棱清角的齿根，而用电解加工时由于存在尖角变圆现象，非得采用小圆角的齿根不可。又如各种复杂冲模如山形硅钢片冲模，过去由于不易制造，往往采用拼镶结构，若采用电火花、线切割加工后，即使是硬质合金的刀具、模具，也可做成整体结构。再如，喷气发动机涡轮也由于采用了电加工而可做成整体结构。

4）对传统的结构工艺性的好与差，需要重新衡量。过去，方孔、小孔、弯孔、窄缝等结构特征，都被认为是结构性很“差”的典型，是设计和工艺人员的“大忌”，有的甚至被列为“禁区”。特种加工的采用大大地改变了这种评价标准。对于电火花穿孔、电火花线切割工艺来说，加工方孔和加工圆孔的难易程度是一样的。喷油嘴小孔，喷丝头小异形孔，涡轮叶片上大量的小冷却深孔，窄缝，静压轴承、静压导轨的内油囊型腔，采用电加工后都变难为易了。过去淬火前忘了钻定位销孔、铣槽等工序，淬火后这种工件只能报废；现在则可轻而易举地用电火花打孔、切槽进行补救。相反有时为了避免淬火开裂、变形等影响，倒是常常把打孔、开槽等工序安排在淬火之后。

2　现代制造业的发展对特种加工的新要求

虽然特种加工已解决了传统切削加工难以加工的许多问题，在提高产品质量、生产效率和经济效益上显示出很大的优越性，但目前它还存在不少亟待解决的问题。

1）不少特种加工的机理（如超声、激光等加工）还不十分清楚，其工艺参数选择、加工过程的稳定性均需进一步提高。

2）有些特种加工（如电化学加工）在加工过程中的废渣、废气若排放不当，会产生环境污染，影响工人健康。

3）有些特种加工（如快速成形、等离子弧加工等）的加工精度、生产率及使用效率等均有待提高。

4）有些特种加工（如激光加工）所需设备投资大，使用维修费高，亦有待进一步解决。

随着现代制造业的飞速发展以及世界制造中心向我国转移，对特种加工技术也提出了一系列新的要求。尤其是在那些国民经济发展最迅猛的高科技领域和国防建设的关键部门，如新材料、新结构、新型微电子机械系统、纳米材料和技术及航空航天领域中，将会有大量的复杂的难加工产品、部件、零件需要采用更特殊的加工工艺和加工手段去解决，从而向我国特种加工科研工作者和广大工程技术人员提出了一系列新的要求。

2.1　模具加工指标的微细化对特种加工的新要求

特种加工的发展与模具工业的进步有着十分密切的关系。市场上对模具的新要求，也随即反映到特种加工方面。

进入信息时代，市场上同一档次的商品在性能上的差别已不是太明显，在服务方面也逐渐趋于规范，因此能否吸引客户，往往聚焦于造型的美观、宜人，外观上的新颖、抢眼，维修时的方便、灵活等。从高端的数码相机、手机、掌中宝电脑，直到一次性使用的打火机和圆珠笔，无不体现出个性化、时尚、张扬的造型和致密均匀的视觉质感以及人机工程的最佳体现。这些把玩于消费者股掌之中而且款式不断翻新的产品，其注塑外壳往往都非常考究，即使是三维空间的卡口等特征、要素也刻意追求尽善尽美，各注塑件之间严丝合缝，浑然一体。由于集成度的提高，在有限的空间里布置更多的功能特征单元，注塑件的微细化倾向十分明显。如一个热继电器模具的型芯嵌件要用256个电极，而一个塑料手表机芯主夹板模具型芯要用60个电极。微细化下型腔的清角已成为充分利用空间的必要条件。微细化还带来加工工艺的复杂化，这就要求特种加工机床必须有极高的可靠性，在较长的加工周期内不会因一个小失误而前功尽弃。产品结构的微细化也造成了此类商品装配上的困难。由于工件过小，人的手指已无法适应这种装配，且凭肉眼照准有困难，必须考虑自动线装配，其效率要比手工装配提高3~10倍，但对装配件的尺寸精度提出了严格要求，否则自动线就会故障频繁。可以说，产品结构的微细化不仅给模具，也给其他方面带来一系列的高精度要求。

下面主要以精冲模和型腔模为例来分析模具加工指标细化对特种加工装备和工艺的新要求。

1）对精密冲模来说，面轮廓度（TKM）是加工细化的一个重要指标。将TKM再进一步的分解，就有型面的凹心、转角精度、刃口的直线性等。如果TKM要达到±1.5 μm，凹心应在1 μm以下，刃口直线性不得超过2 μm/100 mm。对精冲模而言，表面质量不仅是R_a或R_y达到多少，而且在同样的R_a值下，要求有更高的支承能力。从表面轮廓支承长度率曲线和幅度分布曲线来看，控制更好的波峰形状，可以大大减少初期磨损，有利于精确尺寸的保持。要求最少的表面变质层，硬度下降的重铸层要薄，对脆性的粉末冶金材料如硬质合金，要严格防止其微观裂纹的产生以及电解作用下钴黏结剂的腐蚀造成的碳化钨颗粒的松动；对生物兼容材

料金属钛的加工，也要严格防止在切割后表面的氧化及铜、镍等金属微粒的反粘。

2）对型腔模具来说，没有型面的平直，就没有尺寸精度可言。对透明壳体和镜片的模具 R_a 要求达到 0.025 μm，在电火花加工后的抛光是省不掉的，这就要求加工表面硬化层尽可能薄，更不能有波纹。因此，一定要采用在小间隙下逐档精修的加工策略。波纹在 4μm 以下，表面粗糙度 R_a 的不均匀性在 ± 10% 以内，才不会给抛光增添麻烦。

上述这些由于模具加工指标细化而导致的对特种加工的新要求，无不涉及特种加工领域内深层次的工艺难题，有的则要从机理性研究上去寻求答案。

2.2　微电子机械系统对特种加工的新要求

微电子机械系统是集微型机械、微传感器、微能源、微制动器、微控制器、微执行器、信号处理及智能控制于一体的机电装置。微小的几何尺寸，或操作尺寸和高度集成化、智能化是微电子机械系统的显著特征。若按其尺寸划分，可分为 1 ~ 10 mm 的微小机械，1 μm ~ 1 mm 的微机械，1 nm ~ 1 μm的纳米机械。与之相应的微细加工方法也分为微米级、亚微米级和纳米级微细加工。由于微电子机械系统具有体积小、精度高、性能稳定、可靠性高、耗能低、灵敏性和工作效率高、多功能和智能化、制造成本低等特点，正受到国内外科技界的广泛关注，并成为当今世界各国研究和投资的热点。而微细加工技术是微电子机械系统发展的重要基础，其绝大多数工艺手段和工艺方法都与特种加工技术有着极为密切的联系，有些微细加工技术就是特种加工技术和工艺的延伸。可以说微电子机械系统的研究与发展向特种加工技术提出了新的要求，主要表现在如下几个方面。

（1）特种微细加工技术

1）微细电火花加工　微细电火花加工的原理与普通电火花加工并无本质的区别。实现微细电火花加工的关键在于微小工具电极的制作、微小能量放电电源、根据电极的微量伺服进给、加工状态检测、系统控制及加工工艺方法等。由于微小电极本身就极难甚至无法制作，所以利用传统的电火花成形加工方法进行微细三维加工是不现实的。于是人们开始探索使用简单形状的电极，借鉴数控铣削的方法进行三维轮廓的电火花加工。应用微细电火花加工技术，目前已可加工出直径 2.5 μm 的微细轴和 5 μm 的微细孔；可制作出常 0.5 mm、宽 0.2 mm、深 0.2 mm 的微细汽车模具，并用其制作出了微型汽车模型；可制作出直径为 0.3 mm、模数为 0.1 mm 的微型齿轮。

2）微细电解加工　在电解加工中采用微去除技术使得电解加工具有微细加工的可能。因为传统的电解加工往往需要较大的加工间隙，这在很大程度上限制了电解加工的加工精度，如果能大幅度地减少加工间隙，加工精度就显著提高，利用电解加工进行微细加工的可能性也将增大。有人通过降低加工电压和电解液浓度的办法，成功地将电解加工间隙控制在 10 μm 以下；采用微动进给和金属微管电极，在 0.2 mm 的镍板上加工出 0.17 mm 的小孔。

另外，电解加工液用在微细轴类零件的光整加工中。采用类似微细线电极电火花磨削的方式，用一个运动的金属丝作为阴极，在阳极轴和阴极丝之间喷电解液，使轴表面产生电化学微腐蚀。这种方法在直径数十微米小轴的抛光中取得了较好的工艺效果。

3）精密电铸　电铸制孔与切削方法制孔不同，首先要求制造出孔的型芯，然后在其周围生长起电铸金属，最后再把型芯抽出或溶解掉。对于用传统的去除加工无法达到的场合，例如极微细的小孔以及内表面粗糙度要求很高的工件或截面形状特殊的工件，可以采用精密电铸加工。

精密电铸的工件材料为金属镍，型芯材料大多采用铝合金。铝合金可溶于氢氧化钠溶液，而镍不会受损坏，可以放心地操作。制造特别微细的铝质型芯时，切削很困难，可以改用黄铜制作型芯，但需要使用恰当的、不会使镍表面腐蚀而又能使黄铜迅速溶解的液体。这需要多种配方和多次实验才能满意地解决。

（2）微细超声加工

随着晶体硅、光学玻璃、工程陶瓷等硬脆材料在微机械中的广泛应用，硬脆材料的高精度三维微细加工技术已成为一个重要的研究课题。目前，可用于硬脆材料加工的方法主要有光刻加工、电火花加工、电解加工、激光加工和超声加工等。超声加工与电火花加工、电解加工、激光加工相比，不依赖于材料的导电性，有没有热物理作用；与光刻加工相比，又可加工出高深宽比的三维结构，这就决定了超声加工在陶瓷、半导体硅等非金属硬脆材料加工方面具有优势。

微细超声加工除了加工尺寸微小外，与传统超声加工有相同的原理和特征。由于传统超声加工所需振幅一般在 0.01 ~ 0.1 mm 之间，而压电或磁致伸缩的变形量很小（0.005 ~ 0.01 mm），因此必须通过一个上粗下细的变幅杆将振幅扩大。而对于微细超声加工、压电或磁致伸缩产生的振幅已能满足微细加工的要求，因而不需要变幅杆。

利用超声微细加工技术，用工件加振的工作方式在工程陶瓷材料上加工出了直径最小为 5 μm 的微孔。

（3）微细激光成形加工

根据加工材料和机理的不同，对于光固化成形、选择性激光烧结及分层实体造型这些比较成熟的激光成形加工来说，微细激光成形加工则要求通过计算机更精确地选择控制固化区域并进行层层堆积以得到所需要的微细结构。光固化成形的几何尺寸应控制在 10 μm，甚至更微小的结构范围内，而且应解决批量制作的问题。有一项精密光纤阵列技术，可保证一次制造出大量微结构。

影响激光成形加工精度的因素有如下几个方面：

1）深度精度受所铺层厚的限制；

2）受尺寸效应（液态光敏树脂黏度、表面张力等）的影响；

3）微结构变形的影响等。

为了消除这些影响，又出现一种新的激光成形方法：在树脂槽内，将聚焦的激光束在三维空间内进行扫描，只有在焦点处超过曝光阈值时，树脂才发生固化。采用这种方法，能够制造出可自由移动的微结构。

这种技术的优点如下：

1）深度和周边精度由激光聚焦点的大小决定，在三维空间内精度高于 1 μm；

2）不需要任何支撑件，也不需要掩模；

3）消除了树脂黏度和表面张力的影响，因为在液态光敏树脂槽中没有移动件。

（4）高能束刻蚀技术

1）电子束刻蚀　电子束刻蚀是目前最好的高分辨率图形制作技术，在实验室条件下，最高能达到 2 nm 的特征尺寸，在生产中，一般也刻达到 0.5 ~ 1 μm 的特征尺寸。电子束刻蚀的工作原理是利用电子束的化学效应进行刻蚀。用功率密度相当低的电子束照射工件表面，几乎不会引起表面温升，入射的电子与高分子材料的分子相碰撞时，会使其分子链断开或重新聚合，从而引起高分子材料的化学性质和分子量发生改变，利用这种效应，可以进行电子束曝光。曝光主要分两种。一种是电子束扫描型，将聚焦在 1 μm 以内的电子束在大约 0.5 ~ 5 mm 的范围内扫描，可以曝光出任意图形。另一种是缩小投影型电子束曝光，使电子束先通过掩膜板，再以 1/5 ~ 1/10 的比例缩小后，投影到电子抗蚀剂上进



行大规模集成电路图形曝光。

电子束加工要在真空条件下进行。在真空环境中，电子可以高速运动，阴极不氧化，并可避免被加工表面被蒸汽氧化。

2）离子束刻蚀 离子束刻蚀是利用惰性气体元素或其他元素的离子在电场中加速成高速离子束流，以其动能进行各种微细加工的方法。这是在亚微米甚至毫微米级精度的加工中大有发展前途、工艺能力广泛的一种加工方法。具体可分为如下几种。

① 去除加工 首先把氩、氪或氙等惰性气体充入低真空度的电离室中，用高频放电或直流放电使之等离子化（即正离子数与负离子数相等的混合体），在加速电极的作用下，离子从等离子体中成束状被拉出，从工件表面打出原子或分子来，这样可以直接完成工件加工面或图形的蚀刻。离子铣、离子抛光、离子减薄及离子溅射都采用这种原理。

② 镀膜加工 把低能量的入射离子附着在工件表面上的微细加工称为离子附着加工。较典型的离子附着加工是离子镀膜加工。离子镀膜时，利用离子束冲击出来的原子或分子以极大的能量黏附在工件表面，因此镀覆强度高，镀层质量好。利用离子镀膜技术可以制成耐磨、耐蚀、耐热的表面强化膜，以及电子、半导体和集成电路用薄膜。

③ 注入加工 离子注入是将离子加速到数十至数百千电子伏特能量后，轰击工件表面，到达工件表面层的高速离子进入原子间隙或以置换原子的形式嵌入工件表层并保留在表层的过程。在集成电路制作中，离子注入能控制搀杂量而获得集成电路均匀的电参数，在零件制造中，采用离子注入工艺氮实现金属表层改性。

④ 离子束写图 与电子束曝光不同，电子束曝光时，影响分辨率的主要因素是感光胶的灵敏度及二次电子的产生和衬底的反射电子，而离子的质量远大于电子，在固体中散射小，在基片上产生背散射作用弱，引起的临近效应小，所以能制作出线宽小于 0.1 mm 的微细图形。由于离子质量大，颗粒大，进入抗蚀剂后受到的阻力也大，故射程要短，因此离子能量被抗蚀剂充分吸收，使抗蚀剂的灵敏度增大。

3）等离子刻蚀 离子束刻蚀是一种以物理作用为主的刻蚀工艺，等离子刻蚀则是一种以化学反应为主的刻蚀工艺。等离子刻蚀中应用的是低温等离子体，在这种等离子体中，游离基的化学性质十分活泼，利用它与被刻蚀材料的化学反应可达到刻蚀薄膜材料的目的。

4）激光刻蚀 激光刻蚀主要采用固体激光器，CO_2 激光器波长较长，一般不适于微细加工。从理论上讲，激光光点的直径可以达到 1 μm，但现在使用的激光工作物质，由于材料质量不均匀及内部温度分布不均匀等因素的影响，所形成的激光易产生多重振荡或偏心振荡，使激光发散角增大，很难聚焦到 1 μm 左右。不过，由于在焦面上的强度分布有一个窄的能量集中带，这样就存在一个能够用来加工的能量密度的阈值，故能加工出比束斑直径小的孔。激光打孔的孔径可以小到 10 μm 左右，深径比达 5 以上。影响激光刻蚀精度的主要因素有输出功率和脉宽，焦距和发散角，焦点位置，光斑内能量分布，激光多次照射及工件材料等。

2.3 航空航天工业对特种加工的新要求

随着航天发动机推力及可靠性要求的提高，必然会采用一些新材料和新结构，这给特种加工技术发挥重要作用提供了更宽广的舞台。当前广泛采用计算机及自动化技术，提高特种加工技术的柔性，实现用简单的工具电极加工复杂的三维曲面，进一步提高表面质量等是特种加工技术发展的趋势。从我国液体火箭发动机发展的历程来看，特种加工技术的应用将会越来越广泛。例如 20 世纪 80 年代，我国最早的液体火箭发动机的关键部组件的加工，还只有电解加工、电子束焊接等少数几个特种加工工艺得到应用；到了 90 年代初的另一种发动机，特种加工工艺的应用项目有了显著增加，除电解加工、电子束焊接外，特种加工工艺的数量在不断扩大，如电火花成形加工、电火花线切割加工、磨粒流加工、激光加工、微束等离子加工等；到了本世纪初，特种加工技术除了在应用范围上有所拓宽外，更主要的是在应用深度上有了更高的要求，特种加工技术不只是解决加工的可行性问题，更主要是通过实现关键零件的加工来提高发动机的工作性能，如数控电火花加工技术，已不仅是加工复杂的型腔，而是要通过工具电极的复杂运动来实现整体涡轮盘叶片、带叶冠整体涡轮盘的加工，不但使发动机的可靠性得到提高，还可使发动机的工作效率得以提高；磨粒流技术也不只是用来去除毛刺，更重要的是用来去除精密关键零件的表面缺陷，提高发动机的涡流特性等。但是特种加工技术也有其固有的不足之处，最显著的例子是加工效率与加工精度的矛盾。如电解效率高，但精度低，电火花加工精度高，但效率低。如何使加工精度和加工效率都得到提高，这是特种加工工程技术人员面临的一个课题。

2.4 纳米技术对特种加工的新要求

纳米科学技术是目前迅速发展、最富有活力的科学技术之一，受到世界各国的高度重视。纳米科学与技术集合交叉了多学科的内容，是一个融前沿探索、高技术、工程应用于一体的科学技术体系。纳米科技在纳米尺寸范围内认识和改造自然，开辟了人类认识世界的新层次，使人们改造自然的能力直接延伸到分子、原子的尺度水平，这标志着人类的科学技术进入了一个新时代。许多专家认为，以纳米科学与技术为中心的新科技将成为 21 世纪的主导。

纳米科技包括纳米体系物理学、纳米化学、纳米材料学、纳米生物学、纳米电子学、纳米制造学及纳米力学等。纳米科学技术在不同的学科领域有具体的内涵和体现，纳米制造科学技术主要涉及到纳米量级（0.1 ~ 100 nm）的精度、微结构和表面型貌。纳米制造学在纳米科学技术领域占有重要地位，同时也向特种加工技术提出了新的要求。

纳米制造任务不可能由某一项技术独自完成，而是由许多方法和技术共同承担。这些方法相辅相成，各俱所长，构成了纳米制造技术群，承担着丰富的纳米制造任务。

从实现纳米微结构的方式和途径来看，构成纳米制造技术体系的方法可以分为两类。一类是通过原子、分子的移动、搬迁、充足来构成纳米尺度的微结构，所谓的自下而上和由小到大的方法，基于扫描隧道显微镜 STM 的源自搬移方法属于此类"。另一类是通过材料的去除逐步形成所需要的维系结构或器件，这种方式可称为自上而下的方式。特种加工成形技术中的高能流束加工、放电加工、化学刻蚀等主要是靠电、热、光、声、化学等能量形式实现的减材加工以及通过激光烧结成形、电铸等方法实现的增材加工恰好对应于上述两类加工方式。这些成形过程依靠微米尺度的微粒的去除或增加，在微细制造方面表现出优势和潜能。事实上，一些特种加工技术在微细制造领域已经占有重要的地位，说明特种加工与纳米技术有着非常密切的关系。纳米时代的到来，既为特种加工提供了更广阔的舞台和机遇，也向特种加工技术提出了更多更新的要求和挑战！

编写：齐从谦（同济大学）



第3章　材料成形特种加工技术在工程中的应用

1　特种加工在现代制造业中的作用

特种加工技术由于具有其他常规加工技术无法比拟的优点，在现代制造业中占有越来越重要的地位。本章重点以模具制造和航天发动机制造为例来说明特种加工技术在现代制造业中的重要作用。

1.1　特种加工在现代模具制造工业中的作用

在现代制造业中使用模具加工制造产品和零件具有“批量、优质、高效、清洁、低耗”等一系列的优点。模具已成为现代工业生产的重要手段与发展方向，在现代化工业生产中，约60%~90%的工业产品需要使用模具生产，模具工业已成为工业发展的基础，也是衡量一个国家或地区工业水平的一个重要标志。许多新产品的开发和生产在很大程度上都依赖于模具生产，特别是在汽车、电子、轻工、航空与航天等行业尤为突出。

而材料成形特种加工技术由于其特有的“以柔克刚”、“以软制硬”的工艺特点，在模具制造行业发挥了不可替代的重要作用。可以说各种类型的模具加工制造都几乎离不开特种加工工艺。必须采用特种加工工艺进行加工的模具类型有如下几类。

1）高硬度材料制作的模具，如硬质合金模具、金刚石模具、宝石拉丝模具等。这些模具材料具有极高的硬度，只有采用特种加工工艺才能奏效。

2）为避免精加工之后进行淬火热处理产生变形的模具。对于此类模具，先期工序可以按照传统切削工艺进行加工，然后进行淬火热处理，最后一道工序则留给特种加工。由于特种加工具有“以柔克刚”特点，无论再高的硬度也能攻无不克，而且模具材料在淬火过程中产生的残余热应力也能经特种加工后消除，从而延长模具的使用寿命。

3）模具表面难以用传统切削加工实现的微小特征要素或复杂形状。如微细深孔、窄缝、槽、弯孔以及由复杂曲线曲面构成的轮廓面等。

4）需要经过表面处理的模具。有些注塑类的型腔模具，为了保证注塑零件的表面粗糙度及便于脱模，需要对其注塑型腔进行镜面级的抛光处理，这时就只能采用特种加工中的电解抛光、化学抛光、离子束抛光才能实现。还有些模具表面需要强化处理、刻字或特殊花纹，同样也必须采用特种加工工艺中的电火花表面强化、镀覆、刻字以达到目的。

1.2　特种加工技术在航天发动机制造中的应用

20世纪以来，我国航天工业和技术发展迅速，随着运载火箭推力和可靠性的提高，对其动力装置的核心部分——发动机的要求也越来越高。因为发动机推力的大小和可靠性的高低关系到整个运载火箭性能的优劣，为了保证航天发动机在高温、超低温、高压、高速、重载等苛刻条件下工作的可靠性，其部组件大量采用了形状复杂的新结构和新材料。当前提供可靠性和降低成本是航天商业发射的发展趋势，为了满足这一要求，设计部门必须进行优化设计，这些新的要求对传统的制造技术提出了新的挑战，鉴于对有特殊要求的零件用传统的机械加工方法很难完成，也难以达到经济性的要求，在这种情况下，电化学加工、电物理加工、高能束加工、表面光整加工等新型的特种加工方法应运而生，并在当今航天发动机研制中发挥了关键作用。

（1）电化学加工工艺的应用

1）电解加工　电解加工技术最早在前苏联应用于航天火箭发动机叶片的加工制造，它是借助工具阴极，在一定电解液压力下（一般为0.5~4 MPa），利用作为阳极的工件在电解液的介质（通常为NaCl、$NaNO_3$及其复合液）中发生阳极溶解的原理，对金属零件进行成形的特种加工方法。它的特点是加工效率高；工件和工具阴极不接触，无加工切削力；与零件的硬度、韧性、强度、热处理状态无关；能一次成形复杂型面；适合于批量生产。缺点是加工精度不很高；电解产物对环境有污染。电解加工正因为有上述优点，故在液体火箭发动机制造中发挥了重要作用。如整体涡轮转子叶片的零件材料一般采用高温镍基合金（如GH4169、GH40）。这种材料硬度高，难于采用机械切削加工；而整体涡轮转子叶片数量多、叶片间通道窄小（最小可达2 mm），这种结构对机械加工而言，几乎不可能实现。但采用电解加工技术后，这一难题就迎刃而解了。

2）电铸　电铸是用电化学沉积金属或合金的方法制取产品的特种加工工艺。它与电解加工恰恰完全相反，电解加工是阳极溶解过程，而电铸是阴极沉积过程。它与普通的电镀也不同，最大的区别是电铸要求金属沉积层较厚，同时它需要芯模作为仿形工具。在航天发动机推力室设计结构中，有一种部件叫作电铸身部，其内壁采用锆－铜合金沟槽，外壁采用电铸镍结构，常规的机械切削加工根本无法完成这一独特的结构零件的研制。这种零件电铸镍后，通过沟槽在锆－铜合金内壁和电铸镍外壁之间形成冷却和再循环通道，保证液体火箭发动机燃烧推力室稳定而可靠运行。正是运用了电铸技术，才攻克了电铸身部制造的难题。

3）电解去毛刺　电解去毛刺的原理与电解加工一样，是利用电流密度与电化学溶解速度呈递增函数关系的原理来完成工件去毛刺的，不过其工具阴极保持位移精度而不是以一定的速度作进给运动。一般情况下电流密度越高，电化学溶解速度越快。如发动机管道系统的三通或多通零件的相贯线、活门壳体的交叉孔等在机械加工相交孔时，必然会产生毛刺或飞边，如不去除干净，则易通过管道进入到发动机涡轮泵或活门，造成发动机工作故障或活门不能可靠地工作，严重时关系到航天火箭的发射成败。电解去毛刺的特点是速度快、能实现多工位加工、质量可靠。发动机的三通、多通零件、活门壳体等，采用电解去毛刺技术加工后，可以获得很好的表面质量。

4）电解刻蚀技术　电解刻蚀技术是在照相制版的工件上，把不需溶解的部位保护起来而把需要阳极溶解的部位暴露出来，利用金属阳极溶解的原理实现零件加工的。电解刻蚀的深度一般不会太深。某发动机冷氦动密封的动环，为了在低温下控制燃料的泄漏量，达到动密封的目的，在动环的表面需有多条深度和宽度不一的超浅槽，同时要求槽边无毛刺，采用激光加工也未能满足要求，但采用电解刻蚀方法之后，通过精确控制加工参数，这一难题也迎刃而解。

（2）电物理加工工艺的应用

1）数控电火花成形加工技术　电火花成形加工技术实现数控化后在航天领域的应用得到进一步的发展。随着发动机推力提高的需要，整体涡轮转子的叶片不再采用开放式结构，而是采用半封闭式的结构，叶片之间的通道更小，叶形甚至扭曲。这种结构转子的特点是各种效率和可靠性大为提高，大大地平衡了发动机高速旋转时产生的轴向力。从目前

调研的情况看，采用机械加工或电解加工方法均无法完成，多轴联动数控电火花成形加工技术是目前惟一可行的加工方法。

2）数控电火花线切割加工技术　以去离子水为介质的数控电火花线切割加工技术可以很好地完成航天发动机中渐开线花键孔的高精度切割及其他零件的高精度切割，其加工特点是无切削力、精度高，在航天工业中的应用极为普遍。

3）数控电火花高速小孔加工技术　在发动机推力室喷注器活门壳体上往往有很多直径很小的群孔和交叉斜孔。传统加工采用机械切削方法，钻小孔难度极大，效率很低，经常断钻头，严重影响加工质量。采用数控电火花高速小孔加工技术后，加工效率得到很大提高，加工群孔时效果更为显著，质量可靠，加工成本也大大降低。

（3）高能束加工

1）电子束加工技术　电子束加工技术是在真空条件下，利用电子枪中产生的电子经加速、聚焦，形成高能量密度的极细束流，以极高的速度轰击工件被加工部位，使动能转换为热能而导致该部位的材料在极短的时间内达到几千摄氏度以上的高温，从而引起该处材料的熔化或蒸发。电子束加工技术在航天液体发动机制造上的应用主要是电子束焊接。电子束焊接的特点是能量密度高、焊缝深宽比大、变形小、焊缝质量好。航天发动机涡轮泵、活门等系统大量采用由薄壁膜片（最薄可达 0.1 mm）焊接组成的膜片组、最后组焊成的有静密封环组件以及薄壁多层波纹管与圆盘、壳体焊接组成的波纹管组件。这些部组件基本都是发动机的关键件，结构特殊且均为薄壁件焊接而成，焊后尺寸精度要求极高。若采用普通焊接法，输入热量大、变形大，同时受结构的限制，难以加工。而电子束焊接正好发挥了它在这方面的优势，使焊接质量满足了设计技术要求。

2）激光加工　激光加工是一种重要的高能束流加工方法，它的特点是方向性好、光斑的能量密度大，焦点处的功率密度可达 107 ~ 1 011 W/cm。激光加工主要是以激光焊接的方式在航天发动机研制中得到应用。激光焊接的深宽度比大、焊缝质量好，激光加工还可用于加工小孔，如发动机零件的冷却小孔等。

（4）磨粒流加工技术

磨粒流加工的原理是：在挤压力作用下，含有磨料的具有黏弹性、柔软性和切割性的磨料介质形成一个半固态的可流动的“挤压块”，并使之以高速流过需加工的表面，产生磨削作用而去除金属的。该加工工艺的最大优点是能运用“挤压块”的流变特性对金属材料进行切除，来达到零件尺寸的精确性或精细加工的目的；并能得到很小的表面粗糙度，对零件复杂形状的适应性也较强；能批量应用于工业化生产。该工艺在美国及其他一些西方国家的航空航天领域应用较普遍，解决了精密复杂零件在实际使用中出现的低效率、低寿命、低抗疲劳强度等技术关键。该技术主要用于零件表面光整及零件去毛刺工序中，同时还能去除电解加工后存在的晶界腐蚀、电火花成形加工后存在的表面微裂纹以及铸造后零件表面的重铸层等表面缺陷。该技术最初用于战术导弹铝合金整体离心轮、诱导轮数控铣加工后的表面光整、去毛刺。为了确保液体火箭发动机工作的可靠性，提高涡流特性值，其整体涡轮转子、诱导轮、离心轮、涡轮壳体、活门壳体等都需经过磨粒流加工来完成最后加工工序。如选用特殊磨料，还可去除小直径群孔的毛刺。

2　快速原型与制造技术在材料成形工程中的应用

作为增材加工的一种特种加工技术，快速原型与制造技术（RP&M）在材料成形工程中得到越来越广泛的应用。

2.1　新产品开发过程中的设计验证与功能验证

快速原型技术尤其适用于新产品开发、快速单件及小批量零件制造、复杂形状零件的制造、模具设计与制造，也适合于难加工材料的制造、外形设计检查、装配检验和快速反求工程等。

快速原型与制造技术可以快速将产品设计的 CAD 模型转换成实物模型，方便地验证设计人员的设计思想和产品结构的合理性、可装配性、美观性，发现设计中的问题可以及时修改。对有限空间的复杂系统，如汽车、卫星、导弹的可制造性和装配性用 RP&M 方法进行检验和设计，将大大降低此类系统的设计制造难度，显著缩短设计制造周期。对于难以确定的复杂零件，可以用 RP&M 技术进行试生产以确定合理的最佳工艺。此外，RP 原型还是从设计到商品化的各个环节中进行交流的有效手段，如为客户提供产品样件，进行市场宣传等。快速原型与制造技术已成为并行工程和敏捷制造的一种技术途径。

2.2　基于快速原型的快速制造工艺

基于快速原型的快速制造工艺可分为直接制造工艺和间接制造工艺。直接快速制造工艺是指利用 RP 技术直接制造出最终零件/模具，对其进行一些必要的后处理即可达到所要求的机械性能、尺寸精度和表面质量。其优点是制造环节简单，能充分发挥 RP 技术的优势，特别是与计算机技术密切结合可快速完成产品制造，但在产品模具精度和性能控制等方面比较困难，特殊的后处理设备与工艺提高了制造成本，成形尺寸也受到较大限制。

间接快速制造工艺是指通过快速原型技术与传统的成形技术有效结合实现快速制造。由于传统技术的多样性和成熟性，可根据不同应用要求，使用不同复杂程度和成形精度的工艺，较好地控制产品模具的精度、表面质量、机械性能与使用寿命，也可以满足制造经济性的要求。

（1）直接快速制造工艺

直接快速制造工艺可分为六类，其工艺方法特点、典型应用见表 1.3-1。

表 1.3-1　直接快速制造工艺的工艺特点及典型应用

成形方法	工艺特点	典型应用
金属板材叠加成形	基于 LOM 工艺，采用金属片材通过激光切割、焊接或黏结剂粘接	日本使用 0.2 mm 厚钢板，板材两面涂敷低熔点合金，焊接成形；CAM – LEM 工艺采用黏结剂粘接金属薄膜，用激光切割轮廓和分割块
金属粉末堆积成形	激光烧结或黏结剂粘接金属粉末成形	间接、直接 SLS 工艺：采用激光逐点烧结粉末材料，使粉末或包覆于粉末外的固体黏结剂熔融实现材料的联接制造零件模具

续表 1.3-1

成形方法	工艺特点	典型应用
金属丝材熔融堆积成形	金属粉、黏结剂均匀混合，压成具有足够弯曲强度的丝材，FDM设备成形使用	美国Stratasys公司利用FDM设备成形制造出不锈钢、钨及碳化钨材料零件
金属微滴沉积成形	根据零件几何特征离散为数控铣床等工具可加工的"块"，选择沉积成形材料加工成形；沉积支撑材料，铣平	美国Stanford大学形状沉积制造工艺
多相组织沉积成形	利用等离子放电来加热金属丝材料，熔化材料熔积到工件逐渐成形	美国Carnegie Mellon、Stanford大学多相组织沉积制造技术
气相沉积成形	高能量激光热能或光能分解活性气体，沉积材料薄层逐层制造，改变气体成分、温度及激光束能量，可沉积出陶瓷和金属零件	美国Connecticut大学活性气体分解沉淀成形技术

美国MIT的液态金属微滴沉积技术，通过利用金属微粒均匀加热和喷射装置，控制金属喷射振动频率来控制微滴尺寸轮廓和特定微粒结构，并通过电场偏转控制金属微滴直接成形金属零件。

美国AreoMet的MTS Systems Corp开发的激光添加制造（LAM，Laser Additive Manufacturing）系统，是一种近净成形设备，对于单件和小批量金属件来说，由于无须铸造和锻造而降低了工装、工具成本，提高了制造效率，且能满足产品强度和抗疲劳等性能要求。

美国麻省理工学院采用三维打印（3DP，Three Dimensional Printing）工艺，利用不锈钢金属粉，在保证金属粉对所喷射的化学黏结剂具有较好的湿润性的前提下，可制造出金属零件。零件再经去除黏结剂处理和渗铜处理，便可得到高密度件，对其表面进行抛光打磨处理后就可作模具使用。

德国EOS公司（EOS Gmbh－Eletro Optical Systems）是激光粉末烧结技术研究的倡导者之一，图1.3-1为EOS公司研发的激光粉末烧结快速原型系统。图1.3-2～图1.3-4为EOS公司采用快速原型技术制造的一些典型零件。

EOS激光金属粉末烧结设备（EOSINT M250 XTEND）主要性能参数如下：

常用材料：高速钢粉、黄铜粉，粒度分别为0.05 mm和0.02 mm；

分层厚度为0.02 mm/层或0.05 mm/层；

烧结密度可达98%；

烧结精度：±0.05 mm；

加工行程：250 mm×250 mm×185 mm。

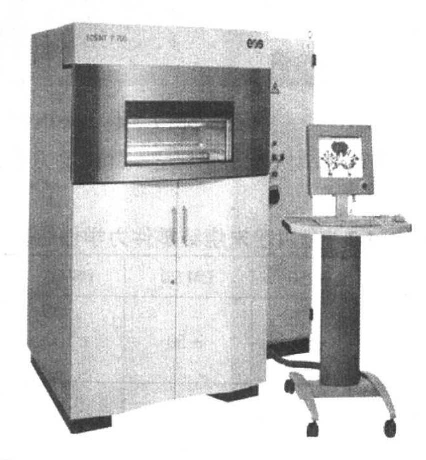


图1.3-1 EOS公司的激光粉末烧结快速原型系统

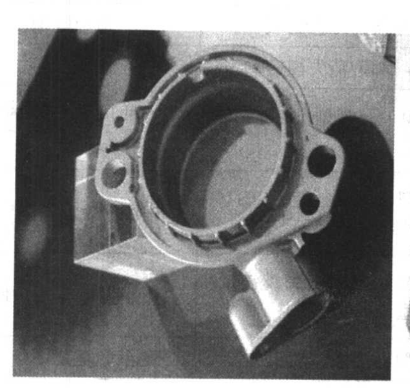
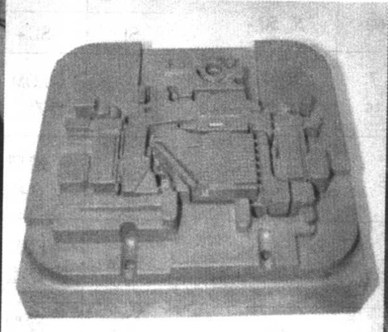
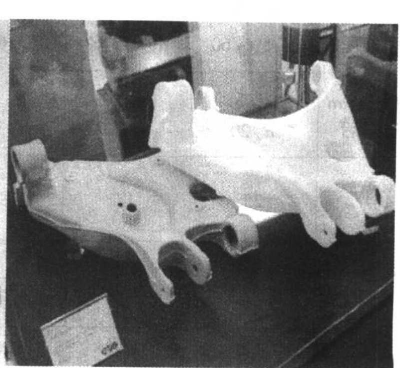




图1.3-2 EOS激光粉末烧结快速原型系统制造的金属成形零件

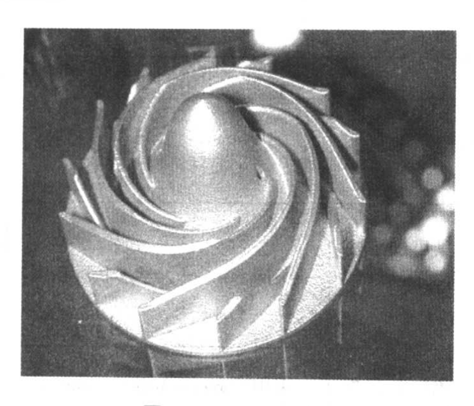
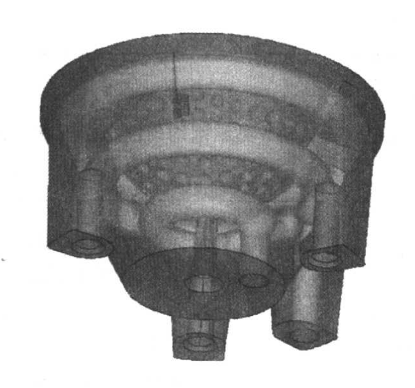



图 1.3-3 EOSINT M250 XTEND 快速原型系统制造成形零件（一）

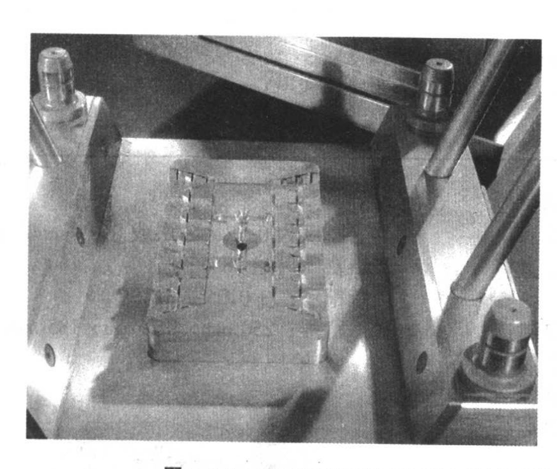
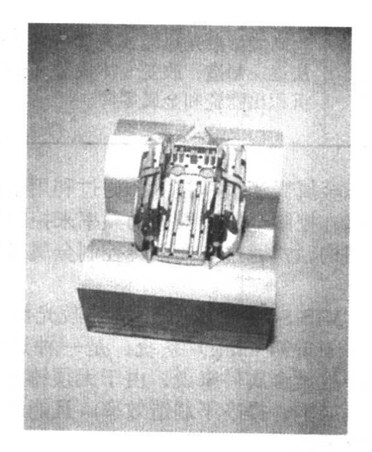



图 1.3-4 EOSINT M250 XTEND 快速原型系统制造成形零件（二）

EOS 金属粉末烧结快速原型制造零件主要力学性能如表 1.3-2 所示。

表 1.3-2 金属粉末烧结零件力学性能表

性 能	DM 50	DM 20	DS 50	DS 20
可实现零件精度/μm	±80	±50	±100	±50
最小壁厚/mm	0.7	0.6	0.9	0.7
最小收缩率/%	20	8	5	2
抗拉强度/MPa	200	400	500	600
硬度 HB	90	110	200	220
表面粗糙度/μm 未进行后处理	R_a 14 R_z 50~60	R_a 9 R_z 40~50	R_a 18 R_z 60	R_a 10 R_z 50
表面粗糙度/μm 后处理进行后	R_a 5 R_z 20	R_a 3 R_z 15	R_a 7 R_z 35	R_a 4 R_z 15
联合线胀系数/$10^{-6}K^{-1}$	25	18	18	9
25℃热导率/$W\cdot(m\cdot K)^{-1}$	15	25	25	13
最高承受温度/℃	400	400	800	800

（2）间接快速制造工艺

RP 方法制造的原型主要以非金属型为主（如纸、ABS、蜡、尼龙、树脂等），在大多数情况下非金属原型无法直接作为模具使用，需要以 RP 原型作模样，经过工艺转换，制造金属模具。间接制造工艺可以概括为精密铸造成形、电铸成形、粉末烧结成形和金属喷涂成形。

精密铸造成形：RP 技术与铸造技术相结合，成本低，尺寸精度难控制。典型的 RP 工艺转化为金属模具的方法对比如表 1.3-3 所示。

美国 3D Systems 利用半中空的 SL 原型表面挂浆，形成一定厚度陶瓷层，烧掉 SL 原型，得到陶瓷型壳，即可用于铸造。无焙烧陶瓷型制造工艺以 RP 原型或转化的硅胶模为母模，翻制陶瓷型，喷烧后可用于浇注金属成形。无加热快速固化非占位涂层制造工艺是涂料直接喷涂到原型上，然后背衬造型。起模后涂料转移到背衬上，不占据零件的有效空间，然后浇注金属，即可获得零件模具。

表 1.3-3 基于 RP 的铸造法制造金属零件/模具

RP 工艺	最佳的工艺路线	适应范围
SL	SL＋熔模/消失模铸造	中小型复杂件
LOM	LOM＋石膏型/砂型/陶瓷型铸造	各种尺寸规格的中等复杂件
SLS	蜡型＋熔模铸造，SLS 砂型直接浇注成形	中小型复杂件
FDM	FDM＋熔模/消失模铸造/陶瓷型	中小型中等复杂件
3DP	砂型直接浇注成形	中小型复杂件

直接壳型铸造是以铸造用的型砂为原料，CAD 驱动直接驱动工具烧结/黏结型砂，制造出铸型。省去传统精密铸造过程中的蜡模、泡沫塑料模、木模的制作等多种工艺过程，是传统铸造过程的重大变革。但一个壳层只能使用一次，尺



寸精度与表面质量的控制是一个很大的问题。

EOS公司激光铸造砂烧结设备（EOSINT S750）成形产品如图1.3-5所示。

EOSINT S750快速原型系统主要性能参数如下：

常用材料：石英砂和陶瓷砂；
分层厚度：0.2 mm/层；
烧结精度：±0.3 mm；
加工行程：720 mm×380 mm×380 mm。



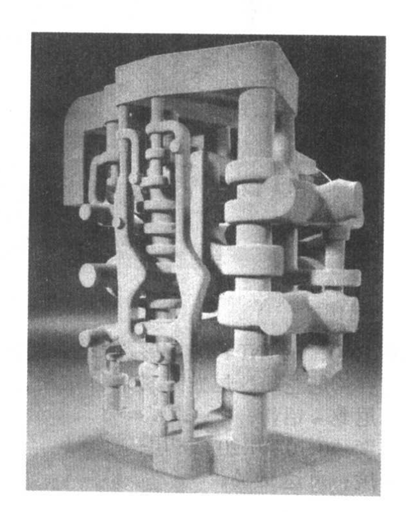


图1.3-5　EOSINT S750快速原型系统制造成形产品

（3）快速模具制造

应用快速原型法快速制造工、模具的技术称为快速工模具技术，目前已成为快速原型技术一个新的研究和应用热点。直接应用快速原型技术制造金属零件或模具是RP领域研究人员的目标，目前也取得较好的应用成果。用快速原型技术制造的零件原型，可与熔模铸造、喷涂法、陶瓷模法、研磨法、电铸法等转换技术相结合制造金属零件或模具。

近年来，模具行业涌现出许多基于RP的模具制造新技术，其共同特点是技术先进，成本低廉，设计制造周期短，精度适中。现在可作到对复杂的型腔曲面无须数控切削加工便可制造，从模具概念设计到制造完毕仅为传统加工方法所许时间的1/3和成本的1/4左右。

这里介绍几种基于快速原型技术的电铸成形、粉末烧结成形及金属喷涂成形工艺等特种加工快速制模技术。

1）澳大利亚昆士兰州理工大学开发了基于SL工艺的电铸制模技术。其工艺为：制造SL原型，翻制硅胶模，电铸成形镍金属壳，安放金属框架，铝粉增强环氧树脂背衬壳层成形模具，可成形0.5～0.8 mm的铝板，优点是精度高，缺点是成形速度慢、模具寿命有限。

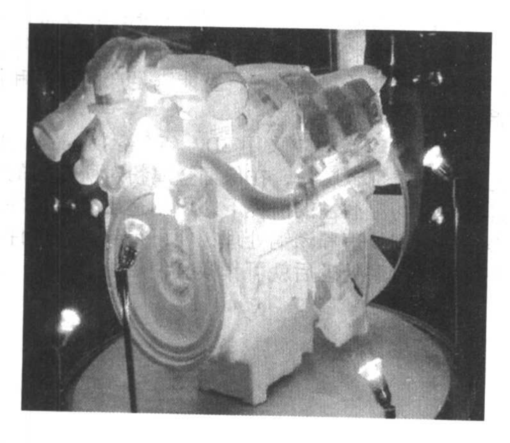
2）粉末烧结成形快速制造工艺是将RP技术与粉末冶金技术相结合，实现金属件的快速制造。金属粉末烧结成形制模主要的问题是如何提高和保证模具的精度，但烧结变形、收缩一直是困扰该种工艺发展与商品化的难点。其典型代表有美国3D Systems公司推出的3D Keltool及美国Drexel大学推出的Rapid Pattern Based Powder Sintering工艺。

3）金属喷涂沉积制模主要是指熔融金属粉末喷涂沉积到RP原型或经RP原型转换的基体上。其工艺过程是金属喷射沉积出金属壳型，之后采用混有金属粉的树脂或金属背衬金属壳层，之后去除基体，即可制造出模具。

（4）基于RP的非金属材料模具快速制造工艺

采用快速原型机制造出SSM、FDM、SL等工艺原型，可用于铸造中的模样或用于设计校验、翻制硅橡胶、环氧树脂模具。也可用CAD直接驱动成形机制造出砂型，如直接壳型制造、无木模成形。

EOS公司激光塑料粉末烧结设备（EOSINT P380，EOSINT P700）主要用于塑料功能件加工及熔模铸造成形，其成形产品如图1.3-6、图1.3-7所示。



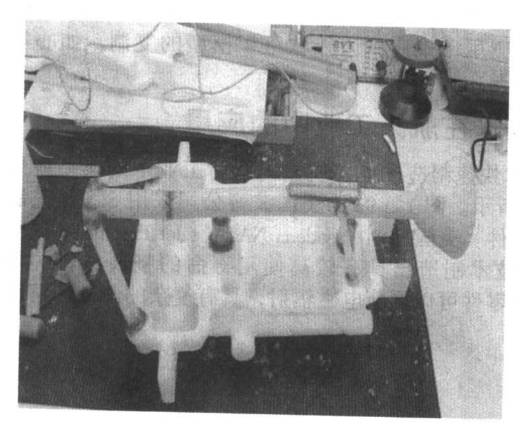
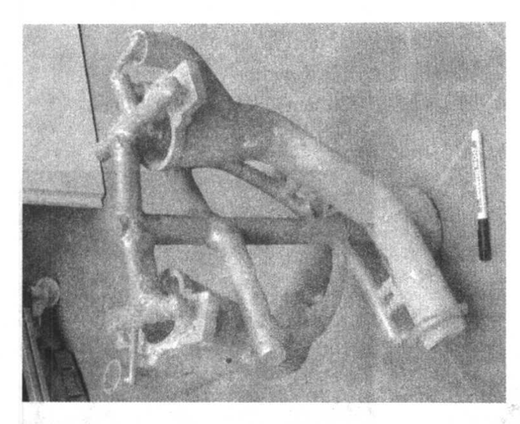


图1.3-6　EOSINT P380成形系统制造成形产品



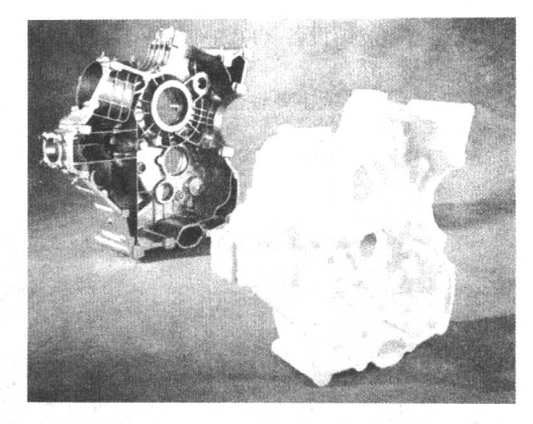


图 1.3-7　EOSINT P700 成形系统制造成形产品

EOSINT P380、EOSINT P700 成形系统的主要性能参数如下：

常用材料：尼龙粉，尼龙－玻璃纤维粉，熔模铸造粉，类橡胶粉，尼龙－铝粉；

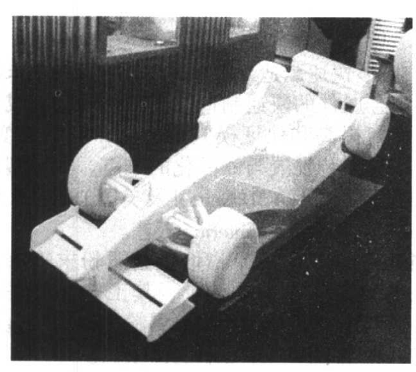
分层厚度：0.10～0.20 mm/层；

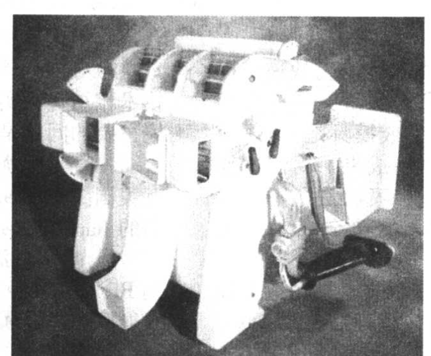
烧结密度：可达 95%；

烧结精度：±0.15 mm；

加工行程：340 mm×340 mm×620 mm，700 mm×380 mm×580 mm

图 1.3-8 为 EOS 公司激光粉末烧结快速原型系统加工的塑料成形产品。





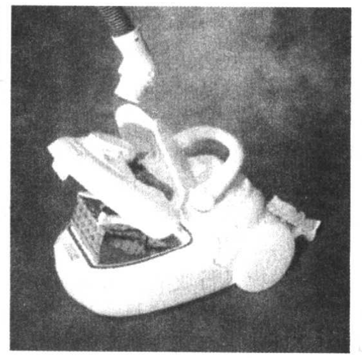


图 1.3-8　EOS 激光粉末烧结快速原型系统制造的塑料成形产品

(5) 生物医学工程

人是自然界最高级的动物，人体的骨骼和内部器官具有极其复杂的内部组织结构，要真实复制人体内部的器官构造，反映病变特征，快速成型技术可以说是目前最有效的方法。以医学影像为基础，利用快速成型技术制作人体器官模型有极大应用价值。它作为医疗专家组的可视模型，进行模拟手术，特殊病变部分的修补（颅骨、颌面骨损伤、耳损伤等）。目前快速原型技术多用于制造人体骨骼模型和人造假肢，最新的应用已推广到人体软组织模型的复制，如心瓣等。

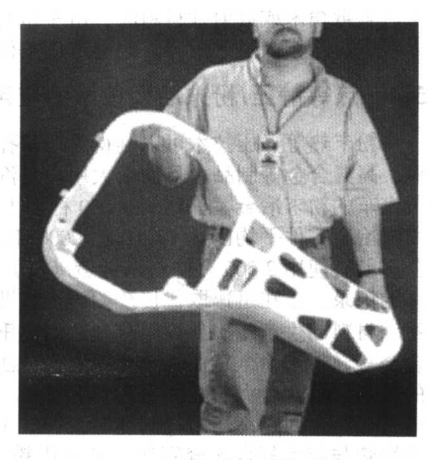
3　RP 技术在航天工业中的应用

RP 技术快速制造技术在航天与国防工业中的典型应用如图 1.3-9 所示。图 1.3-9a 为美国波音公司采用 SLS 工艺制造的金属零件。美国加州 Pasadena NASA's Jet Propulsion 试验室采用 RP 技术制造出具有较高使用寿命的坚硬材料的零件，制造的零件可以屏蔽电磁辐射，具有复杂的薄壁和精细结构，尺寸精度可以达到±0.125 mm。图 1.3-9b 为采用 RP 技术制造的零件。美国 Woodward Governor 公司采用 RP 技术制造复杂的飞行器燃烧系统（图 1.3-9c）。传统的工艺至少需要245 天制造模具，84 天制造金属零件，采用 RP 技术仅仅用 60 天就制造出金属零件，且费用仅仅是传统工艺的 20%。

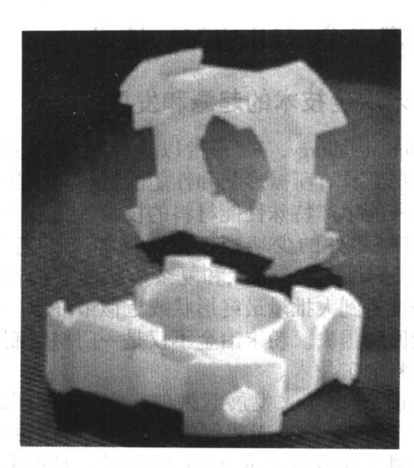
美国 AreoMet 的 MTS Systems Corp 开发的 LAM（Laser Additive Manufacturing）系统，是一种近净成形设备，对于单件和小批量金属件来说，由于无需铸造和锻造而降低了工装、工具成本，提高了制造效率，且能满足产品强度和抗疲劳等性能要求。

美国麻省理工学院采用 3DP（Three Dimensional Printing）工艺采用不锈钢金属粉，在保证金属粉对所喷射的化学粘结剂具有较好的湿润性的前提下，可制造出金属零件。零件在经去除粘结剂处理和渗铜处理，便可得到高密度件，对其表面进行抛光打磨处理后就可作模具使用。

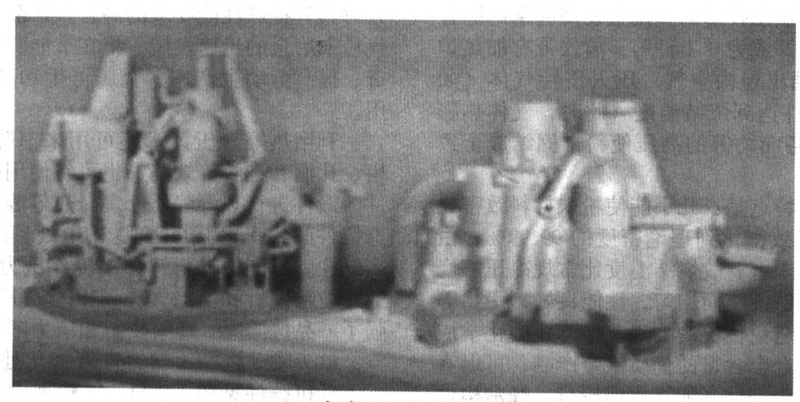




(a)发动机零件



(b)宇宙飞船上的零件



(c)复杂飞行器的燃烧系统

图 1.3-9　RP 技术在航天中的典型应用

4　橡胶垫板成形技术及其在工程中的应用

4.1　橡胶垫板成形技术的起源与发展

瑞典 Avure Technologies 是世界超高压加工工艺与设备商品化生产的发源地，也是预应力技术工业化应用的发源地。早在 20 世纪 70 年代，我国就从该公司引进热、冷等静压机，世界上用于航空的板料柔性成形设备及热、冷等静压技术与设备大多产自该公司。其超高压技术起源于该公司 1953 年的人造金刚石所采用的丝缠绕压力机技术，20 世纪 90 年代开发出 1 500 MPa 的最大的橡胶垫板成形机。

橡胶垫板成形过程可一次完成成形和下料，效率高，降低手工劳动成本。成形后的零件表面无划伤，零件的成形尺寸精度高。相对手工成形，提高了产品质量。可成形铝合金、不锈钢、钛合金、高温合金等材料的钣金件，成形厚度和拉深尺寸主要取决于成形时的液体压力。对于双层复合结构的结构，可以一次成形，这对于其他工艺来讲是难以做到的。

4.2　橡胶垫板成形装备技术和应用

从目前的应用情况看，橡胶垫板成形装备 93% 用于航空、航天行业，其余用于汽车制造业。航空、航天企业所选的设备尺寸大于 ϕ1 m × 3 m，成形时压力 100 ~ 140 MPa，可以根据用户的具体需要设计制造。橡胶垫板成形压机设备本身的关键技术是放置成形模具的高压容腔制造，采用了预应力技术和专用数控缠绕设备，在高压容腔的外表面缠绕 400 km 长的高强弹簧钢丝，使容器处于 − 600 ~ − 800 MPa 压应力状态。在 140 MPa 工作状态下，容器的内应力仍为 − 50 MPa 的受压状态。橡胶垫板使用寿命为20 000 ~ 30 000 次，使用中发生破损可以修补。橡胶垫板为专用材料，制造厂家可以提供。橡胶垫板成形压机仅需凸模即可完成深、浅压延成形，如与快速模具技术配合起来，可使模具费用下降到传统复杂曲面金属板料成形模具的 1/10，节省了生产准备时间，尤其适用于小批量生产和新产品开发。

对于目前航天运载武器上广泛采用型胎和手工方法相结合生产的多种产品（典型件见图 1.3-10），都可使用橡皮垫板成形技术。目前国内主要是各大航空制造厂有这类设备，航天企业中还没有类似设备。

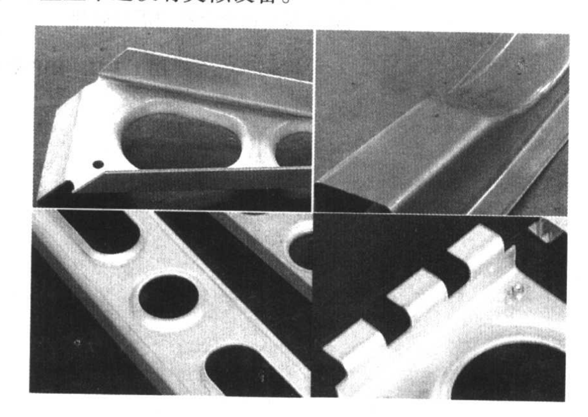


图 1.3-10　可采用橡皮垫板成形的典型航天产品用零件

5　热等静压/粉末冶金（HIP/PM）技术

5.1　热等静压/粉末冶金技术的起源和发展

粉末冶金（Powder Metallurgy，PM）指以金属粉末为原料，经成形或烧结，得到具有所需形状和性能的材料与制品的工艺技术。它是一种能生产特殊性能材料的技术，又是一种能制造廉价优质机械零件的少切削、无切削加工工艺。PM具有多用性，它可适用于简单形状和复杂形状的零部件制作。可生产从中等批量到大批量最终形状或近似最终形状的零部件，且几乎无原料损失。粉末冶金不仅是一门材料制造技术，又是一门材料加工技术。

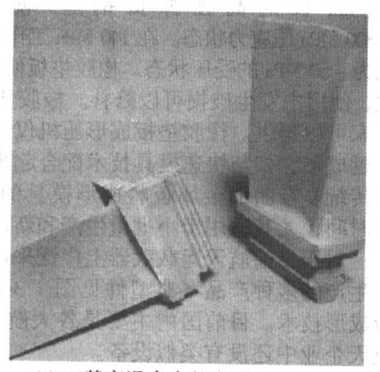
热等静压技术是近20多年来发展起来的，它是将粉末或被压材料（简称"工件"）放置于热等静压机中，升温到烧结温度（通常为材料主成分熔点的2/3）的同时，对粉末或被压材料施以各向均等的高压压力，使其热致密化到理论密度。这是在冷等静压和热压技术的基础上发展起来的综合工艺。将粉末装入包套（即成为"工件"），放入带有加热炉的密闭高压随体内，并抽出包内空气，压入惰性气体（如Ar气），通电加热，使工件达到烧结温度（此时，气体热膨胀升压），借助于高温和各向均等的高压使粉末固结成全致密的材料。

热等静压技术的基本特点是：几乎能使粉末材料致密化到理论密度，使金属材料致密化到理论密度的99.99%；由于等静压力作用于高温粉末上，故烧结温度比常规冷压—烧结工艺低，得到的制品晶粒细小而均匀，性能良好；用热等静压技术制取的制品，可避免传统冶金工艺中存在的化学成分偏析，并可以制得更高合金含量的优质冶金产品；可以直接得到形状复杂的大型冶金部件（如飞机涡轮盘、蜂窝构件等）；与传统冶金工艺比较，节约原材料，减少冶金或机加工过程，节约能源，从而降低产品成本；使用热等静压技术生产有毒粉末或放射性材料时，由于包套是密闭的，可以大大减少对操作人员的危害，改善劳动条件。

5.2　热等静压/粉末冶金技术的应用

粉末热等静压技术可以制得无残留孔隙，全致密的高速钢、高温合金等制品，目前最大用户是汽车工业。如用于北美汽车的粉末冶金零件达到1 000种以上，福特公司每辆车粉末冶金零件平均已达17.5 kg，2000年达到了20 kg。福特公司已有使用2 500万件粉末锻造（PF）发动机连杆无一损坏的记录，正在迅速取代传统的铸造和锻造的连杆。在一些特殊材料的生产中，如高温合金、高速钢、不锈钢、特种铝合金等，粉末冶金工业性大规模生产方法已比较成熟。最大的粉末高温合金涡轮盘，直径约为1 m。单重数百千克的核电站热能主回路高压耐蚀阀体、直径达1 m的薄壁高温合金无缝管与超大复合无缝管等，都是用粉末冶金方法制备的，最大的粉末高速钢锭重为3 t。热等静压工艺设备投资大，只对具有特殊性能要求的高合金产品才能显示其优越性。现代粉末冶金的迅速发展，将在节能、节约金属、节约战略物资、提高劳动生产率、金属再生和环保等方面发挥巨大作用。

利用热等静压技术还可用来消除铸件、锻件的内部疏松、孔洞和裂纹等缺陷，也可将使用中产生内部缺陷的旧铸件、锻件进行热等静压修复。热等静压机广泛用于对精密铸造铸件的致密化HIP处理。HIP处理的目标是排除铸件中封闭气孔。不同的材料铸件温度、压力和时间处理参数不同。通过熔解偏析和消除气孔，HIP改进了材料组织一致性，增强了产品抗低周、高周疲劳和应力断裂特性，尤其适用于航空、航天发动机的关键铸件致密化处理。HIP处理的典型航空发动机铸件见图1.3-11。一般来讲，钛合金铸件几乎不可能做到没有气孔，但利用金属高温、高压惰性气体环境下塑性变形、蠕变和扩散连接效应，可做到完全去除气孔。



(a) Ni基高温合金航空涡轮叶片



(b) 大型Ti-6Al-4V航空发动机壳体铸件

图1.3-11　HIP处理的典型航空发动机铸件

编写：齐从谦（同济大学）

王至尧（中国航天科技集团502所）



第4章　材料特种加工成形工程的技术发展动态和趋势

1　特种加工技术的发展动态

1.1　总的发展态势

特种加工技术自20世纪中叶开始工业应用以来，发展极其迅速。到了20世纪90年代，尤其是最近10年间，特种加工技术进入了新一轮创新发展阶段。总体上来讲，在电加工方面，从工具电极、加工介质、加工对象到电极驱动机构等各方面都有诸多的创新发展；在三束加工方面，更是朝着高能量、高精度、超微细加工方面发展；在快速原型技术、激光快速成形和快速模具制造等方面同样取得了令人瞩目的进步。

总的来说，特种加工在学术和技术上应该朝着如下几个方向发展：

1）按照系统工程的观点，加大对待特种加工的基本原理、加工机理、工艺规律、加工稳定性等深入研究的力度。同时，充分融合以现代电子技术、计算机技术、信息技术和精密制造技术为基础的高新技术，使加工设备向自动化、柔性化方向发展。

2）从实际出发，大力开发特种加工领域中的新方法，包括微细加工和复合加工，尤其是质量高、效率高、经济型的复合加工，并与适宜的制造模式相匹配，以充分发挥其特点。

3）污染问题是影响和限制有些特种加工应用、发展的严重障碍，必须化大力气利用废气、废液、废渣，向“绿色”加工的方向发展。

可以预见，随着科学技术和现代工业的发展，特种加工必将不断完善和迅速发展，反过来又必将推动科学技术和现代工业的发展，并发挥愈来愈重要的作用。

1.2　特种加工技术发展状况

今天的电加工技术与20世纪30年代拉扎林科时期的电加工相比已有了惊人的变化，尤其是伴随着它的服务载体——模具工业的发展而迅猛发展，并以它特有的优势弥补了传统机械切削加工的某些不足；在有些场合下，作为材料成形的特种加工工艺已逐渐转化为常规工艺，足以说明电加工技术已具有相当强的生命力和发展潜力。但毋庸置疑，特种加工技术和工艺的发展和创新应该是永无止境的。

在工具电极方面，电火花成形加工用的工具电极一向以铜、石墨等材料为主，现在发展到使用以表面改质为目的的硅半导体、各种粉末烧结体等多种类型的材料。在微细加工中多用细钨丝。电极形状也从过去常见的实体电极、电极等，发展到使用框状电极、网状电极等，用以尝试实现高速加工。电极制作方法除常用的电铸法外，还有熔射法等，微细电极的制作还可用线电极磨削法等。

加工介质方面，传统的加工介质是较单一的煤油系加工液、水系加工液，现在则探索在上述加工液中混入各种微细粉末的混粉工作液以达到不同的加工目的，在大气中或在氧气中加工同样也引起了重视。另外，采用加、减压仓、超声波振动等技术来控制加工介质状态或采用喷射、喷雾、液体氮等都在不断探索中。

对于加工对象，除了零件、模具加工，还有切削工具加工及工具表面改质加工等。尤其是微细工具电极的微细电火花加工及线电极磨削法，已成为该领域的标准方法。另外，过去的加工对象以钢材为主，现在则可以加工半导体材料、绝缘性陶瓷材料及低熔点合金材料等，使加工材料的范围大为拓展。此外，电火花加工除了去除材料加工，还可实现表面改质加工和材料堆积成形。上述许多成果突破了传统常识的限制。

随着机电一体化技术的发展，电极驱动机构也在不断发展，驱动执行机构原来是比较单一的回转式电动机，现在增加了压电元件、磁致伸缩振子驱动机构及电磁式线性电动机等，使脉冲驱动机构、微动蜗杆机构等的应用得以实现。小型电动机的驱动还在超声波重叠式、机器人式等方面进行了探索。同时实现电极和工件成形加工的机构也已登台亮相。此外，鼹鼠挖掘式弯曲打孔机构也在开发使用。

下面，从几个方面具体介绍特种加工的一些最新发展状况。

（1）微细电火花加工

由于电火花加工是非接触加工，其平均加工反力极小，因此用微细工具进行微细加工具有特别的优势。但微细加工的工具电极如何制作和安装固定等尚需专门研究。

线电极磨削法（WEDG）在电火花加工机床上直接把电极加工成形，加工成形后的电极不必卸下来，而直接进入下一阶段的工件成形加工，被认为是开创了划时代的电火花加工方法。此法像普通电火花线切割加工一样，工具电极沿着导向轨道不断推进，因而不受电极消耗的影响，从而可以实现高精度加工。最近，已提出在同一台机床上实现微细电极的粗加工、精加工以及用已成形的微细电极同时在工件上打孔的机构设计方案，并正向实用化迈进。

另外由偶数压电元件组成的微动蜗杆式电极推动装置，被用于燃料喷嘴的微细打孔加工中。这种方式电极无须保持架，且进给响应迅速，可用于数千赫兹的伺服机构中。

微细电极除了用于燃料喷嘴、纤维喷丝头、油墨喷头等的加工外，还可以通过扫描电火花加工技术实现微小三维加工。但三维加工中，如何尽量避免非加工侧面的电火花放电，从而保证加工精度，还有待进一步研究。微细电极电火花加工由于有广阔的应用市场作后盾，必将得到进一步深入发展。

高精度永远是电火花线切割技术发展的主题。AGIE公司推出AGIECUT VERTEX顶级精度双线自动交换切割机，X、Y、Z三轴行程为220 mm × 160 mm × 100 mm，最大关键尺寸为200 mm × 200 mm × 80 mm，最大关键重量35 kg，机床自重3 200 kg。可以达到表面轮廓精度TKM ± 1 μm，最佳表面粗糙度 R_a 为0.05 μm，可使用最细电极丝为0.02 mm。它和MAKINO公司的UPH－2机床相比，规格差不多，加工对象基本相同，但使用工作液不同，后者用油，前者用去离子水，很明显VERTEX的效率要高得多。该机床秉承瑞士高精度机床精工细作的传统，规格小而机床自重不小，与承重450 kg的中规格线切割机自重差不多，以保证精度的长期稳定。设计中特别注意使工件、导轨和长度基准——作为闭环测量用的光栅尺之间距离尽可能小，这样导轨移动中的一点点角位移所造成的阿贝误差可减少。严格控制工作液的水温与流向和机内热口空气的流畅，以保持整机热稳定，从而减少热变形。

（2）新材料的电火花加工

具有电、磁等方面功能的材料很多为陶瓷，因此陶瓷被认为是推进21世纪产业进步的主导材料之一。但这类材料又脆又硬，为了得到复杂、精密的形状，有时要进行多种加工方法的试验。在电火花加工方面，导电性陶瓷材料的加工已开始实用化。研究表明，导电性陶瓷材料的加工特性与金属等一样，也取决于热导率和熔点（或沸点），基本上与材料的硬度无关。

在电火花精加工中，当用硅半导体材料作为电极时，由于其电阻大的缘故，电极消耗非常之大，反过来看，当硅材料作为被加工材料时，就可实现高效率加工。国外一些学者对微型机器中硅材料零件的微细加工和硅材料的切断加工等进行了探索，证实了上述结论。可见，硅材料的电火花加工实用化已为期不远了。

把绝缘性陶瓷置于油中进行电火花加工，必须先在被加工物体表面覆盖上被称为辅助电极的导电体。工具电极贯穿辅助电极后，依靠加工油分解出来的碳元素附着于绝缘体表面，使之保持导电性，从而实现对绝缘体的电加工。辅助电极可紧压于绝缘材料表面的金属板、金属网，也可通过蒸镀、涂抹等方式使绝缘材料表面形成碳素导电膜。用电火花线切割加工绝缘性陶瓷材料时，必须上下两面同时涂覆导电体，然后在油中进行加工。对复杂零件或物体采用电火花线切割加工，几乎成了独一无二的加工方法，而电火花成形加工与现有的磨削加工在加工速度、工具费用等方面将展开竞争。

（3）高速电火花加工

近年来，CAD/CAM技术的发展和工具材料的改进，使硬质材料的切削加工成为可能，包括精加工在内的一套模具的加工时间已经缩短一半以上。

对于电火花加工，一方面，从粗加工来说，其加工速度已不比其他加工方法逊色，而像硬质合金这样特别硬的材料的加工则非电火花加工莫属。另一方面，到目前为止，从粗加工到精加工，在各种条件下的电火花加工所需要的时间，还不能单靠电极面积、形状等来推算。特别是精加工时，不仅要考虑电极交换时间，在很大程度上还取决于操作者的经验和水平。如果在各种电火花线切割加工条件下单位时间的放电次数和单脉冲放电去除材料的体积可以控制，加工速度或加工时间就能准确计算。因此，在喷流方法、电极抬刀动作等方面继续开展研究，保证放电点的分散，从而通过单脉冲放电的集积来正确预测整体加工，以及包括电极交换在内的各工序的进一步完善，是今后的努力方向。

在电极制造方面，用高速铣削加工石墨电极的速度特别快，电极制造已不再是电火花成形加工的难题，尤其是在微细型腔的加工方面，数控电火花铣削技术受到青睐。在2001年汉诺威机床展上，三菱电机公司推出了超高精度三轴直线电动机的MA2000数控电火花铣床，配有专门为此研究开发的微细加工脉冲电源，在微细电极高速旋转和直线电动机无间隙平稳进给下，采用薄层行切工艺完成微细型腔加工，方向正确，水准一流。

在驱动方式上，过去常以滚珠丝杠驱动工作台，近年来，不断探索采用新型的驱动方式，如具有快速响应的电磁式线性驱动装置、压电元件和磁致伸缩振子驱动装置等的应用已成为一种发展趋势，这些都有利于电火花加工速度的提高。另外，用火焰状电极进行扫描裁切加工等使形状创成速度显著提高的方法在低熔点合金模具制作中发挥了显著作用，如果电极的消耗量能有效地控制，将有望取代切削粗加工。此外，像模具冷却水路等弯曲孔的打孔电火花加工研究同样引人注目。

在微电极高速加工方面，最近也有许多惊人的成果。如在氧气介质中的反应电火花加工就是其中之一。这种加工中电极几乎没有消耗，但加工速度却超过在液体介质中的加工。这种在气体中的电火花加工以及在电解液中对红宝石等饰物进行细孔电火花加工与表面改质加工等一样，将成为对电火花加工作为（高温、高压）化学反应加工的重新认识的标志。

（4）电火花线切割加工效率大幅度上扬

当前电火花线切割加工在模具和零件加工中的应用范围不断扩大，技术性能进展迅速，但作为标志性的300 mm^2/min最高切割速度几乎10年内没有被突破。而随着大工件、特别是大厚度切割的需求日益增多，市场压力很大。如果说常规切削加工高效的突破口在刀具，是刀具的创新才会有今天的高速铣削；那么电火花切割加工效率提高的突破口就是电极丝、脉冲电源及其控制系统。要上效率，就要用大电流，要承受大电流，除了电极丝材料需进一步改善之外，就是要加粗直径。但电极丝直径一旦加粗，切缝就会变宽，金属蚀除量增大，切割速度就上不去，这恰恰成了一对互相制约的矛盾。所以电极丝的改进对提高切割速度的作用是有限的。因此主要的手段应放在后两项。首先需要高峰值窄脉宽的放电状态，放电电流中绝大多数的电子流用于冲击作为阳极的工件，形成放电凹坑，并将坑中的金属以气相抛出，带走大部分的热，工件热影响层就浅，对脆性金属材料也不易发生微观裂纹，窄脉宽使间隙中碰撞电离产生的高质量阳离子来不及冲击作为阴极的电极丝，也即极间的能量分布有利于提高切割速度。这样既有利于提高单位电流的蚀除量，又有利于保护电极丝不受热冲击。此外，还要有好的监控系统，以防过量的集中放电造成的断丝。电火花加工是单通道放电，但又以交替的局部集中放电形式进行。在一处放电的同时，蚀除产物的抛出必然会造成此处的间隙污染，而第二次放电跟踪而上，只有此处凹陷较大，才会换个地方放电。当电极丝在工件表面切入时能看到火花沿着电极丝上下游走，每一个亮点就是一串火花。因为单个脉冲延时太短，肉眼是不可能看到的。由于工作液在高速冲刷，电极丝也在走，电极丝上某一点能承受多长的一串放电也是个变量。监控系统的作用就是检测每一发脉冲，最大限度地放过有效脉冲，并在过量集中放电出现前刹住，让间隙冷一冷，就能换个地方放电。控制要准，过松就会断丝，过紧效率则会下降。由于放电过程是微秒级的，所以监控动作要在纳秒级的时间内完成。正是由于上述三大难题在技术上有所突破，MAKINO公司在U86大型机上用ϕ0.33 mm镀覆丝进行切割可达到350 mm^2/min的速度，在直线切割500 mm厚的工件时，也能有100 mm^2/min的速度。三菱电机公司在FX系列机上用ϕ0.3 mm镀覆丝可以达到325 mm^2/min，其最新的FA－V系列机床上用ϕ0.36 mm电极丝可以达到惊人的500 mm^2/min的速度。Charmille公司在2002年9月向中国用户推出了新的ROBOFIL 240cc/440cc线切割机，配置了一种叫Clean Cut的脉冲电源，Charmille公司提供了该脉冲电源的全台详细资料。

上述Clean Cut脉冲电源的工艺特色如下。

1）高效率　切割一个材料为K107钢，全部为圆弧连接的苜蓿叶型孔，高60 mm，周长433 mm，仅用1 h。采用新研制的ϕ0.33 mm渗锌纯铜丝SW33xcc，由于粗加工变质层薄，所以精修次数可以减少，使总加工时间与现有机床比要快30%。

2）保证表面完整性　一次切割后变质层在10 μm以内，4次精修后小于1 μm；加工硬质合金无微观裂纹，无电解作用，没有钴黏结剂的溶解和碳化钨颗粒的脱落；对生物兼容材料钛的切割不会有表面氧化和铜、锌的反粘，不会造成污染影响使用。

3）加工表面高质量　在切割PCD（聚晶金刚石）和硬



质合金刀具时，可以得到零缺陷表面粗糙度（R_a 为0.2 μm）和光滑锋利的刃口。

Clean Cut 脉冲电源的工艺参数和性能是：

1）粗加工规准峰值电流可达 1 200 A，电压 250 V，脉冲前沿宽度小于 150 ns。

2）精加工规准峰值电流小到 0.5 A，电压 60 V，频率 2 MHz。

3）全程 AE 防电解交流脉冲，平均电压 $U_{cp}=0$。

4）可编程脉冲电流波形，粗加工为三角波，中加工是不规则矩形波。

Clean Cut 脉冲电源最关键的技术是 ASIC 火花控制器，它生成脉冲波形，监测火花间隙，是对随机事件作适应控制的专用芯片。该芯片外形尺寸 35 mm × 35 mm，有 240 根引出线，中心硅片尺寸 8 mm × 9 mm，包含 400 000 个晶体管，组成 100 000 个逻辑单元，每秒可作 20 000 000 次运算（一次运算时间为 50 ns）。从建立点火电压到过滤级能量输出之间有500 ns供检测。ASIC 有充裕的时间来做出判断，决定该脉冲是否放行。ASIC 用数字拟合脉冲电流波形，比模拟控制迅速、灵活，一致性好，也为开发新波形、新工艺提供了方便条件。

(5) 高速走丝电火花线切割加工质量控制体系初步建立

这里特别强调高速走丝电火花线切割加工技术，是因为高速走丝电火花线切割加工技术是 20 世纪 60 年代末由我国特种加工工程技术人员研究发明的一种具有创新意义的技术，高速走丝数控线切割机（WEDM－HS）是我国特种加工技术人员首创的一种自动化、数字化的特种加工设备。自从 20 世纪 60 年代末期，第 1 台“复旦型”快走丝数控线切割机在上海问世以来，这种新型的加工设备在我国的制造业、航空航天、兵工、仪器仪表、家用电器、汽车、电机等行业得到了极其广泛的应用，尤其是在模具加工制造方面发挥了巨大作用。据统计，我国高速走丝数控线切割机的拥有量为 8 万余台左右，居世界第 1 位，国内生产厂家近百余家，从业人数达数十万人（含操作人员）；2002 年的年生产能力达到 1.5 万台，年总产值达 8 亿元，年对外出口额约 2 000 万美元。尽管在加工精度和控制功能等方面，高速走丝数控线切割机还不及慢走丝数控线切割机，但是，由于它价格低廉、操作简便，仍然非常适合于中等精度和表面粗糙度的零件或模具加工的要求。在我国特种加工技术人员的不懈努力和孜孜追求之下，高速走丝数控线切割机的一些主要功能和切割指标（最大切割厚度、切割效率及切割表面质量）不断攀升，正在接近和赶超慢走丝数控线切割机的加工水平。

几十年来，我国广大特种加工工程技术人员为提高高速走丝电火花线切割加工技术的整体水平，做出了许多卓越的贡献，尤其是在提高高速走丝电火花线切割加工质量和加工稳定性方面，取得了十分可喜的进展：加工精度可控制在 ±0.005 ~ ±0.01 mm 范围之内，最大切割速度稳定在 100 m²/min，加工表面粗糙度达到 R_a 2 μm，并初步建立了高速走丝电火花线切割加工质量控制体系。该体系的基本框架如图 1.4-1 所示。

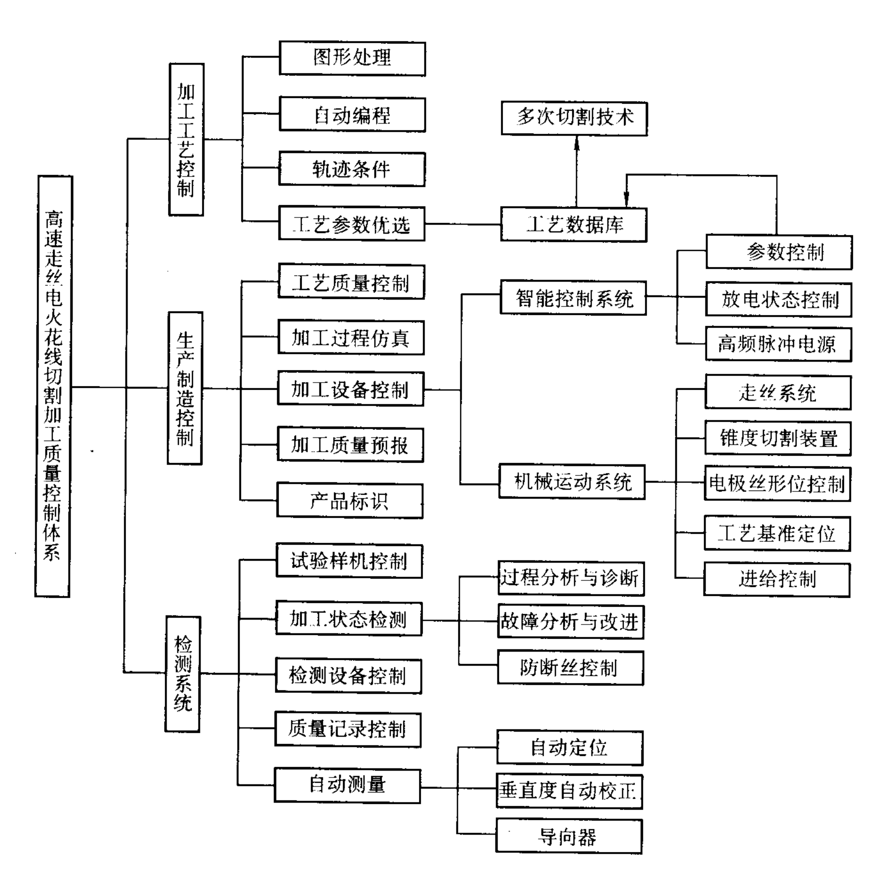


图 1.4-1　高速走丝电火花线切割加工质量控制体系

高速走丝电火花线切割加工质量控制体系的关键技术包括如下几部分。

1）高速走丝系统　高速走丝电火花线切割机的走丝机构，能实现高速走丝，是 WEDM－HS 的最显著特色，但又恰恰是影响其加工质量及加工稳定性的关键部件之一。高速走丝会造成导向器（导轮、导向块等）的磨损和系统的振动，加上电极丝的张力不易控制，将会给加工稳定性、加工精度及表面质量带来严重影响。

多次切割工艺是提高电火花线切割综合工艺指标的有效途径，在低速走丝电火花线切割机上早已普遍采用，但由于



高速走丝电火花线切割自身的特性及其设备条件的限制，主要缺陷之一是电机丝运行的平稳性远比低速走丝机床差，其中电极丝张力的一致性、恒定性差是一个主要方面，不仅容易发生振动，而且电极丝的空间形位不易准确控制，难以再现已切割的加工轨迹，致使多次切割工艺至今难于在高速走丝机生产实践中推广应用。

2）加工工艺控制　电火花线切割加工的工艺规程设计（包括电规准参数等）一直是电加工智能化、自动化发展的一大障碍。近年来，国内企业、高校结合并借鉴国外低速走丝电火花线切割机床的经验，开展了大量的研究工作，取得了长足进步。基于图形的 CAD/CAM 一体化自动编程系统已经比较成熟。在 AutoCAD 等图形处理平台上绘制出精确的零件轮廓，可替代原来需要人工完成的繁琐、复杂的编程工作，自动生成加工代码，加工出零件，大大提高了编程的质量和效率。

3）工艺数据库　准确地定义线切割加工中放电参数与加工效果之间关系的数学模型是比较困难的，因此线切割加工的工艺效果往往取决于操作者的技术水平和经验。为了解决这一问题，一些高速走丝电火花线切割机的生产厂家为用户提供了一个工艺参数表，以帮助用户合理地选择电加工工艺参数。这种方法有一定的局限性。随着 CAD/CAM 技术的进步，人们希望能用人工智能的方法建立起放电参数与加工效果之间关系的模型，尽可能地建立专家系统，实现放电参数的自动选择。专家库的基础是知识库，针对高速走丝电火花线切割机，知识库主要表现为工艺参数表及工艺数据库。工艺数据库主要内容是各种加工条件下的工艺组合。

4）加工过程仿真　线切割自动编程系统虽然在后置处理模块中可以生成数控加工代码，但代码的准确性却有待检验。实际生产中，一般采用切割样件的方法来检验，效率低，成本高。根据数控线切割机床控制系统的插补原理，通过相应的插补运算，在屏幕上模拟显示线切割机床的电极丝运动轨迹，实施图形仿真和物理仿真，以检验数控代码，预测加工过程状态和加工质量，是高速走丝或切割工艺的发展方向之一。

5）加工控制系统　电火花加工控制系统是电火花加工机床的灵魂，伺服进给控制系统和脉冲电源加工规准的选择及控制直接关系到零件的加工质量、加工效率和加工稳定性。电火花线切割加工中，由于检测量与控制量之间的非线性关系，使得经典控制理论难以取得较好的效果，因此从 20 世纪 80 年代起，现代控制理论特别是自适应控制理论被广泛应用于电火花加工控制系统。

脉冲电源是电加工机床的重要组成部分，其性能的优劣直接关系到放电加工的速度、精度和稳定性、工件表面粗糙度以及电极耐加工性。目前，高速走丝电火花线切割机床所配备的高频脉冲电源基本没有智能功能。为了提高加工质量，急需设计实时自适应控制的智能化高频脉冲电源，对间隙放电状态进行实时检测，并按照理想的线切割加工方案，对加工参数进行实时处理，从而实施智能化控制输入到放电间隙的脉冲能量。与脉冲电源密切相关的还有电源参数的控制问题，它不仅涉及到电源技术，同时还涉及到自动控制领域。有效地控制脉冲电源的脉冲波形前后沿，将会对电火花线切割加工的丝损、稳定性、加工速度和精度等产生良好的综合效果。

在电火花精加工中，放电间隙仅为几微米至几十微米，传统的伺服电动机和滚珠丝杠构成的伺服执行机构在指令脉冲和实际位置之间存在数十毫秒的滞后，实现稳定、平滑的伺服并保持较高的精加工效率比较困难。此外，自动穿丝和自动重穿丝、立柱冷却和塌角误差等也是机床机械系统需解决的问题。拐角误差是近年来国外各大公司重点解决的一个影响加工精度的问题。

对于高速线切割加工，断丝问题一直是较严重的问题。目前由于断丝的原理还不十分清楚，从热传导理论出发对工艺参数与断丝之间关系的研究还很不成熟，对电极丝温度的预测与实际情况有较大的差别，这使得对断丝进行主动控制难以实现。为了防止断丝，保证加工质量，采用在速度控制回路进行反馈的半闭环控制，根据不同的加工状况来调节进给速度，将会是一项很重要的措施。

6）加工在线检测　为了提高机床性能，提高加工精度和改善表面质量，要求检测系统必须能够监测到精确反映工况的信号，后继系统才能在此基础上进行建模、预报，以消除滞后现象，改善加工状况。基于数控的质量保证系统要求系统实现在线实时控制，因此，对控制与决策速度要求很高。人工调节控制阈值或固定控制阈值，在自动化生产或无人化生产中是根本不可行的；利用神经网络技术和模糊控制技术，建立质量保证系统的控制模型和专家系统，是满足这种大型非线性系统要求的一种很好的手段。

（6）特种加工技术的信息化

作为一项制造技术，信息化是其发展的必由之路，尤其是用于高档型腔模具的电火花加工过程信息量很大，而且其中的电火花加工工艺业外人士很难掌握。故各大电火花加工机床供应商纷纷推出电火花加工的信息化服务项目，在单机自动化、自主化技术的机床上，开发了 PDM（产品数据库管理系统）。例如 Charmille 公司车间级的 JES 工作站、Agie 公司的 AGIESOFT ML20、SODICK 公司的 Mr.Sodick、三菱电机公司的 LAN－FTP 和 LAN－PNC、MAKINO 公司的小型数据处理中心 CIM 等。这些系统的作用是将电火花成形机、机外预调机（专用三坐标测量机）、高速加工中心、电火花线切割机联成网，共享 CAD/CAM 数据。高速铣削或电火花机按电极的收缩量加工电极，高速铣削进行型腔预铣，随后在机外预调机上确认电极的收缩量、型腔加工余量和它们的定位尺寸。工件和电极带着检测的补偿数据送到电火花成形机去加工，最后也许还要用线切割机切割嵌件的外形或镶件的型孔。信息流随着工序进展在系统内实现通畅的传递，同时也避免了人为的差错。

（7）表面改质加工和堆积加工

利用硅半导体材料作为电极进行电火花加工时，其消耗量比被加工物体的去除量要大得多。因此极间会充满大量的硅粉末，这会使被加工物体表面形成一层具有极高耐蚀性的含硅物质。用其他材料作电极时，其消耗量通常取决于材料的固有热物性。为使电极材料更易于附着于被加工物体表面，通常将电极材料的粉末经压制或电火花加工半烧结成形后使用（硅材料除了其热物性，还因其电阻大，因而放电点附近热量大，从而使其消耗量大）。电火花加工中被加工表面形成的覆盖膜比其他表面改质法形成的覆盖膜与母材的密着性更高。

用 Ti 系（如 TIH_2）电极在油中进行改质加工时，Ti 和油中分解出来的碳元素发生化学反应，表面形成 TiC。另外，用半烧结 TiC 作电极对硬质合金（WC）进行改质加工后，加工表面的硬度可达 2 200～2 800 HV 值。实践表明，对冲裁模具刀刃进行表面改质后，其使用寿命显著提高。

加工表面的覆盖现象，不仅对过去“电火花加工只用于去除材料加工”的常识是一种极大的冲击，也展现了电火花加工的新领域——表面改质加工和堆积加工。去除加工和改质加工可同时在一个加工机械中完成，使得去除加工成形和电火花加工表面改质加工或堆积加工这一复合加工变得很容易。另外，对电火花线切割加工而言，利用电解现象，可通过控制阳极氧化物膜的厚度来实现着色加工。由此可见，表面改质加工法在未来的模具、工具、零件等加工的应用上具

有广阔的前景。此外，如果在合适的条件下使材料堆积速度大于去除速度，将使电火花加工条件下的堆积加工成为可能，这种崭新的加工方法的应用也是指日可待的。

(8) 快速原型技术和激光快速成形技术

快速原型技术是 20 世纪 90 年代发展起来的一项先进制造技术，自美国 3D SYSTEM 公司推出第一台商品化的 SLA 快速成型机以来，已有十余种不同的快速成型设备及与之相配套的软件系统问世，其中比较成熟的有 SLS（光成型技术）、LOM（分层实体制造）、SLA（立体光造型）及 FDM（熔丝沉积制造）等。由于 RP 技术可以明显缩短产品开发周期，提高产品开发的成功率，降低产品开发成本和投资风险，因此在发达国家制造业的产品开发过程中得到迅速的推广应用。我国从 1992 年开始跟踪和引进 RP 技术，经过不太长时间的努力，先后开发成功了 SLS、LOM、SLA、FDM 及 3DP（三维打印）等不同种类的快速成形技术与设备，而且有些设备和技术在材料低廉（纸基型材料）、实用性强等方面具有明显的中国特色。

快速原型与数控加工、铸造、金属喷涂、硅胶模等传统工艺结合，已成为现代模具制造的有力手段。快速模具制造工艺的特点在于把快速原型技术与传统技术相结合，互相补充，使模具的设计和制造周期缩短。快速制模从模具的概念设计到出模所需时间，约为传统模具加工的 1/3 左右。例如，用快速原型制件作母模，浇注蜡、硅橡胶、环氧树脂、聚氨酯等软材料，可构成软模具，将其与熔模铸造、陶瓷型精密铸造、电铸、冷喷等传统工艺结合，即可制成硬模具，能批量生产塑料件或金属件。快速原型技术与三维扫描仪、立体成像技术和激光断层扫描仪结合可以复制已存在的实物，包括人体头像和人体复杂骨骼（如颌面骨）等。

2　材料特种加工成形工程展望

特种加工技术经历了半个多世纪的应用和发展，在制造业和材料成形加工领域有着相当重要的、不可替代的地位和作用。与其他先进制造技术一样，特种加工正在研究、开发推广和应用之中，具有很好的发展潜力和应用前景。

特种加工技术除了要在应用范围上有所拓宽之外，更重要的是应该在应用的深度上有更高的要求，即不只是解决加工的可行性问题。新方式的特种加工方法，都是在扬弃过去特种加工尝试的基础上发展起来的。特种加工不会局限于目前的模具加工为主，而会应用到复杂形状的精密零件加工、表面改质加工和功能性材料加工等，特种加工的对象将不断拓展。加工精度、加工速度和效率、加工形状及其控制等将会越来越完善，可以预测特种加工技术必将成为本世纪技术创新的核心之一。

这里主要从特种加工的微细化、高精度、信息化、智能化等方面来展望其发展的趋势。

2.1　特种加工技术向微细化方向发展

(1) 微细电火花加工

在放电加工过程中，每一次脉冲放电造成材料微团的去除和放电坑的产生，无数个相继产生的微小放电坑最后形成了所需要的最终形状和表面状态。实现微细放电加工必须减少单脉冲蚀除量和进行微量进给，因此关于微能电源和微量进给控制的研究将会得到重视并取得新的进展。另外，实现微细加工中微细电极的制造和安装也是关键所在。采用线电极电火花磨削技术制作和安装微细电极将会得到迅速发展，并将拓宽到三维微型腔的加工。此外，利用线电极电火花磨削技术反拷出柱状微细电极，然后采取与数控铣削相近的方式进行三维微细轮廓的数控电火花铣削加工也将进入实用阶段。

(2) 电化学加工

电化学制造技术的原理分为两类。一类是基于阳极溶解原理的减材加工技术，如电解加工、电抛光等；另一类是基于阴极沉积原理的增材加工技术，如精密电铸、电刷镀等。这两类技术有一个共同点，无论是材料去除还是材料增加，其成形过程都是以离子的形式进行的。由于金属离子的尺寸非常微小，因此这种微去除的方式使得电化学制造技术在微细制造领域有着令人向往的前景。

实际上，微细电铸技术已经在微细制造领域得到了重要的应用，并涉足于纳米尺寸的微细制造之中。如激光防伪商标模板和表面粗糙度样块是电铸的典型应用，这两者都涉及到纳米尺度的微细型貌。从原理上讲，如果不考虑应力变形、孔隙率等影响，电铸技术的复制精度应在纳米到亚微米量级。与其相比，电化学去除技术－电解加工技术所能达到的精度和微细程度目前还远远不能与电铸技术所达到的精细程度相比。电解加工的杂散腐蚀、电场和流场的多变性给加工精度带来很大的限制，目前成形电解加工还不能称为精密加工技术，纳米或微米级的电解成形加工还处于愿望或设想阶段。电解成形加工要想在微细或纳米制造领域有所作为，真正发挥它在原理上的优势（离子级去除），还需要有创造性的发展。

(3) 微细束流加工

准分子激光波长短、聚焦光板直径小、功率密度高，非常适合于微细加工和半导体材料加工。将准分子激光技术与数控技术相结合，可以直接在基材上扫描刻写出微细图形，或加工出微细结构。目前准分子激光直写方式可加工出线宽数微米的高深宽比微结构。电子束、离子束也是非常重要的微细制造技术。电子束加工是在真空条件下，利用聚焦形成的高密度电子束冲击零件表面，使材料局部熔化和气化来进行加工。这一技术可用于某些微细加工，如打孔、切缝、刻蚀。在微米量级微孔加工中，电子束可实现每秒数千孔甚至数万孔的高效加工，同时也是一种重要的光刻技术。离子束加工原理与电子束相似，也是束流经过加速、聚焦后冲击到材料表面。不同之处是在于离子的质量要比电子大几个数量级，因此离子束具有更大的动能，主要是靠撞击效应来进行材料去除。在离子束加工中，其束流密度、离子能量可精确控制，所以离子刻蚀可以达到纳米级的加工精度。离子束的加工效率很低，这恰好适用于微量去除的场合。除了用于改变零件几何形状的目的外，离子束也用于表面性能增强，如离子镀膜和离子注入，同时也是一种有效的光刻手段。

2.2　特种加工技术向高精度方向发展

特种加工的精加工目的是为了获得表面粗糙度值低、精度高的加工表面。对于电火花高精加工而言，单脉冲放电能量不仅要小，而且放电位置要分散。过去在精加工之前，必须将粗加工面用手工进行打磨，尤其是大面积加工时，对明显粗糙之处及熔融残留物冷却后造成的裂纹等予以消除。否则，由于精加工时的极间距离极小，很容易造成拉弧，且由于静电容的增大使单脉冲能力增大，从而影响加工质量。

电火花精加工模具零件时，需要采用较小的放电能量和加工间隙。这样当加工面积较大时，工作和电极间就会形成较大的寄生电容，导致易产生集中放电现象，影响表面的加工质量。采用在普通煤油工作液中添加固体微细粉末的方法，来增大精加工的极间距离，减小电容效应，增大放电通道的分散性，从而可使排屑好、放电稳定、加工效率提高，并有效降低加工表面的粗糙度值。同时使用混粉工作液还可在模具工件表面形成硬度较高的镀层，提高模具型腔表面的硬度和耐磨性。

解决上述问题的对策是用硅半导体材料等作为电极或在

加工液中加入硅、铝、石墨等微细粉末，这种方案已被充分肯定。一方面，在硅材料作电极时由于电阻增大的缘故，静电容被自然地分割，使单脉冲放电能量得以限制。另一方面，一般来说，电火花通过极间粉末向附近传播，因而电火花放电产生的加工粉末是引起持续放电的原因，因此，在狭小的极间，如产生粉末滞留，就会在滞留处产生集中放电，即形成拉弧。如事先加入加工液的微粉末量远远超过加工时产生的粉末量，就易使放电分散。并且，加工液中加入粉末，还会使极间距离增大，从而使加工屑更容易排出，极间静电容也小得多。但是极间距离的增大，也可能导致加工精度下降。因此，探索最佳加入粉末量和电极驱动伺服方式，使极间距离减少，从而使加工精度提高，是今后的努力方向。

把三维型腔精密成形技术与电火花镜面加工技术紧密结合起来，实现模具三维型腔的精密成形及镜面电火花加工一体化，将会大幅度地提高特种加工的精度和表面质量。

2.3 特种加工技术向信息化方向发展

信息化是当前制造业发展的热点。特种加工的发展应该也必须紧密与信息技术相结合，走信息化的道路。

为了实现制造业的信息化，制造业的改造和发展需要围绕三个主要层次进行，即零部件设计和加工的信息化，重要生产环节的信息化以及生产全过程的综合信息化。

对生产过程中的一些重要环节，应大力发展和推广“直接数字控制（DNC）”技术，即利用计算机控制的数字机床生产各种重要的零部件。只有在直接数字控制的基础上，才能构造和发展“柔性制造系统（FMS）”，使得不仅零部件的生产由计算机控制，而且零部件在生产过程中不同工序间的传递也由计算机控制，并因而使生产更具有“柔性”。此外，正在不断发展的各种计算机辅助制造（CAM）技术，将各个生产环节及生产要素与计算机联成一个整体，从而更合理地利用和组织资源，既提高效率又保证质量，也是制造业信息化重点之中的重点。这同样也是特种加工技术信息化发展的方向。

基于分层制造思想，利用简单工具实现三维成形加工的去除型特种加工技术，其中包括数控电火花仿铣加工技术、数控电化学铣削加工技术和数控超声波加工技术。普通的电火花、电化学、超声波成形加工利用形状拷贝原理将工具的形状复制到工件上。要得到一定精度的模具三维形状，就需要制作与其形状相同、凸凹相反的工具，并严格控制工作液在加工间隙中的流场分布。为节省大量的复杂形状工具的制造费用和时间，简化工作液的流动控制，可采用简单形状的工具，依照数控铣削那样依靠机床的成形运动来加工出复杂的模具三维型面的新型加工工艺技术。这必须解决如下几个技术难题：

① 实现加工过程的稳定控制；

② 具有确定的材料去除规律及工具损耗规律；

③ 实现工艺过程建模；

④ 研制出相应的CAD/CAM软件。

为有效地简化问题的复杂性，将采用类似快速成型的分层制造加工模式，并严格控制每一层的加工余量，确保工具只有底面实现加工，而侧面不参与加工，从而使复杂的模具三维型面加工问题转化为一系列平面加工问题。

(1) 电加工机床的数控化和网络化

电火花加工机床的数控系统是整个机床的核心部分，其控制性能不仅直接影响电火花机床加工的质量和稳定性，而且也是扩大机床加工范围，实现复杂加工的重要手段。世界各工业发达国家通过发展数控技术、建立数控机床产业，促使机械加工业跨入一个新的“现代化”的历史发展阶段，从而给国民经济的结构带来巨大的变化。我国的数控技术经过近40年的发展有了较大的进步，但在目前的国内市场中，中、高档产品主要被进口产品占据，而我国的产品仅在较低档的经济型数控机床市场上占据主要地位。在我国，对于整个机械制造业而言，普遍存在自动化程度低，功能、可靠性等远远落后于世界先进水平的现象，更多的是处于一种跟踪性研究状态，没有形成具有自身特点的发展道路。而且，还存在对先进的数控系统盲目引进，引进过程重视硬件，忽视软件，不同部门、行业之间相互技术封锁等弊病，所有这些均制约了我国在数控技术方面的发展。

现在，一些大公司已经开始将16位或32位的工业PC机应用于线切割机床，但仍以DOS为其主要系统平台，也有的采用Windows操作系统。Windows系统作为应用最广泛，功能最为强大的操作系统，已引起很多科研人员的注意，并成功开发出了很多已经商品化的产品。由于它界面友好、系统资源丰富、开发非常容易，且功能强大，在市场上取得了不俗的成绩。然而，由于Windows操作系统体系结构庞大，对内存等硬件资源的要求较高，最主要的它还是一个分时操作系统，实时性不强。因此，很难开发出基于Windows的高性能数控系统。

数控系统是电火花线切割加工机床的核心部件，高速走丝电火花线切割机床大多采用单板机和单片机，随着科技的进步和生产的需求，开始向开放式和智能化数控系统发展，表现为以PC为基础的数控系统平台，目前主要是Windows操作系统。值得一提的是，尽管已经有了基于PC的电火花线切割机数控系统，但主要用于加工轨迹的编程和控制，PC机的资源并没有得到充分开发利用。实际上，在PC机的基础上，线切割数控系统就可以实现CAD/CAM系统的集成、实时多任务控制、多功能控制、高度智能化和高自动化等功能。

线切割数控系统具有一系列优点，如：

当前的数控系统平台又多了一种选择，就是基于Linux嵌入技术及Linux操作系统的数控平台。Linux技术的飞速发展和Linux操作系统开放源代码、丰富的软件资源；功能强大的内核，且性能高效、稳定；支持多种体系结构；完善的网络通讯、图形、文件管理等机制；支持大量的周边硬件设备、驱动丰富；系统大小、功能可定制；良好的开发环境，不断发展的开发工具集；广泛的软件开发者的支持和价格低廉等。另外，还有它支持强实时性能的扩展等诸多优点以及嵌入式技术，给现代数控系统的系统平台提供了一个非常好的选择，也为我们对数控系统的研究和开发拓宽了一种新的思路。

近年来数控加工设备在我国机械制造业的占有率呈快速上升趋势，但这些数控加工设备大多处于单机运行方式。采用手工或微机辅助分段输入、分段加工的方法，设备利用率普遍较低。随着数控加工设备增多和现代生产管理需要，众多制造企业纷纷提出要求，将数控加工设备联网，构成DNC（Direct/Distributed Numerical Control）系统，可进行数台加工机床的直接连接或Intranet/Internet连接，以实现资源共享、数据库优化、远程教学及故障诊断等功能，实现集成化控制和管理。近几年国内外对DNC系统的研究非常活跃。

网络化数控装备也是近两年国内外机床展览会的一个新的亮点。数控装备的网络化将极大地满足生产线、制造系统、制造企业对信息集成的需求，也是实现新的制造模式如敏捷制造、虚拟企业、全球制造的基础单元。国内外一些著名数控机床和线切割机床生产厂家都在近几年推出了相关的新概念样机，如在EMO2001展中，日本山崎马扎克公司展出的“Cyber Production Center”（智能生产控制中心，简称CPC）；日本大隈机床公司展出“IT Plaza”（信息技术广场，



简称 IT 广场）；德国西门子公司展出的 Open Manufacturing Environment（开放制造环境，简称 OME）；日本沙迪克公司的 DNC Internet 的 MARK30 加工机等，这些都反映了数控机床加工向网络化方向发展的趋势。

在国内，有很多厂家和科研院校在这方面也做了一定的研究工作，但进展不快。主要研究的是通过网络进行线切割加工机床的互连，实现远程教学的目的；还有的在 DOS 平台下实现"一拖四"，主要是实现远程文件的上下传输控制等简单功能。

(2) 基于网络的快速原型和快速模具制造技术

快速成形技术面向网络化发展，即实现基于 Internet/ Intranet 的快速原型制造，是发挥二者各自长处的最完美的结合。快速原型（RP）技术及其设备的网上服务和应用，是基于 Internet/ Intranet 的网络化制造的一个很出色的范例。

RP 技术及其设备涉及多方面的技术，应当而且能够通过先进的网络技术，进一步加强技术集成，以实现资源共享、敏捷化响应、异地协同制造，使其发挥更大的、应有的作用。

网络上的远程服务体系可以在资源的提供者和需求者之间架设起现代化的桥梁，可以通过 Internet/Web 分布式网络计算与网络安全支持技术，建立基于 Web 客户机/服务器分布式计算模式的、支持多个用户、多个站点的远程服务系统的体系结构，从而实现不同地域或不同区域的用户共享快速成形技术及设备，并由此而带动的三维 CAD 设计技术资源及快速模具制造技术（RT）资源的共享。后者恰恰覆盖了特种加工的各个分支技术，如激光三维扫描技术与设备、石墨电极研磨技术、铜电极电铸成形技术、金属喷涂制模技术与设备以及与之配套的电火花成形加工、电火花线切割加工技术及设备等。

图 1.4-2 所示为基于 Internet/Intranet 的快速成形和模具制造系统的基本框架。

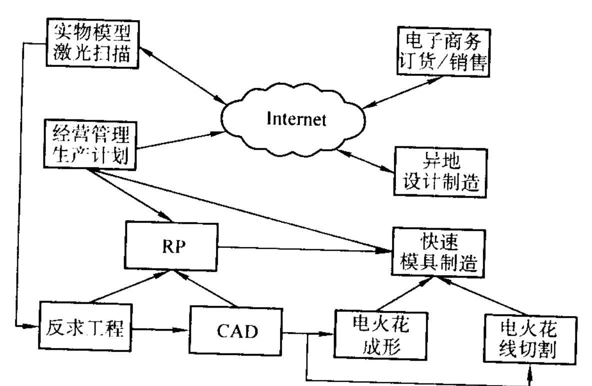


图 1.4-2 基于 Internet/Intranet 的快速成形和模具制造系统基本框架

从目前我国快速原型技术及设备的研究、开发和应用单位的实力和地理分布来看，已初步具备了利用 Internet/ Intranet 网络技术对其资源、技术进行集成，实现网络化快速原型制造的条件。北京以清华大学、隆源公司为带头羊，早在 20 世纪 90 年代初期就开始致力于 SLS 技术的研究及多种快速原型机的商业化开发；华东地区的上海交通大学、南京航空航天大学等于 1998 年开始提供快速原型制造中心的上网服务，同济大学、香港理工大学联手与香港某些中小型企业开展联网合作制造模具的试验；西北地区以西安交通大学为骨干成立了西北 RPM 应用服务中心，并已向中国计算机网络管理中心申请了 RPM 网址（www.crpm.org.cn）；华南的广东、深圳有关部门充分利用本地区的经济优势，依靠网络手段联合经营实体，以快速原型技术为龙头，为广大中小型企业提供以产品开发为内容的 CAD、CAM 共性技术服务，取得了良好的社会效益和经济效益；华中地区更有佼佼者华中科技大学在快速原型技术研究开发方面作了大量的工作。

利用当前正在发展起来的网络化环境把这些分布在全国各地的快速原型和快速模具制造中心——或者称之为"节点"——联成一个整体，实现制造资源的综合调度、充分利用和共享。由此而产生的技术、经济效益和社会效益将是十分巨大的。它不仅会引发制造业生产模式的变革和创新，还将对制造产业的信息化产生深远的影响。

为了积极推进网络化制造，很多 IT 业界的软、硬件供应商都在竭力提升其产品的网络功能。一些著名的三维 CAD/CAM 软件，如 PRO/E，UG，CATIA，SOLID WORKS 等，在近几年的版本更新中都毫无例外地增加和完善了它们的网络功能，可以通过网络获取产品的数据模型，或由激光扫描装置读取实物曲面上点的坐标而得到的点云，以实现逆向工程，或生成三维实体的数控加工指令和刀具轨迹，再通过网络传送到异地加工制造。例如 AUTODESK 公司去年推出的新产品 AutoCAD 2000，大大强化了软件的网络功能，扩展了用户可利用的数据资源范围，用户可以在设计过程中充分利用网络技术，获得位于网上任一地址的 AutoCAD 文件，如 DWG 文件、DXF 文件等，实现对象超级链接、打印和数据共享等。获得 AutoCAD 2000 网络授权的用户可以随时和任何人建立联系，不论文件存于 Web 还是企业的 Intranet 上，用户都能利用 AutoCAD 2000 与之相连。

在网络环境下，上述这些 CAD 软件所具备的功能，已经把传统意义上的产品设计转化为"产品模型"信息的生产和传输，而快速原型和快速模具制造则是对这些信息进行加工和再生产的最易实现的生产制造方式。基于网络的快速原型和快速模具制造技术将对制造产业的信息化，尤其是对产品设计和制造过程的信息化产生极为深远的影响和推动作用。

美国 M.Burns Ennex 公司总裁在他的一篇题为《Atoms from Bits: The Digital Revolution in Manufacturing》的论文中认为：21 世纪的产品制造将是计算机打印文件一样的概念，通过网络将形成个人化工厂（Personal Factories）。数字制造真正的物理产品来源于数字化的信息，或者说，这就是原子来源于比特。

英国 Dr. David Ian Wimpenny 的题为《Rapid Manufacturing——Is Feasible?》（快速制造——可行吗?）的论文最后也写到：在他展望未来时，也许将来某个时候客户将设计他们自己特殊需要的产品或者每一个家庭均装配一个快速制造单元，通过 Internet 卸载他们的产品。

"原子来源于比特"，"通过 Internet 卸载产品"——这些论断在 5 年前听起来也许不可思议，但是现在它将成为现实，而且首先是由基于 Internet/Intranet 的快速原型和快速模具制造技术来实现的。

2.4 特种加工技术向智能化方向发展

(1) 人工智能技术

人工智能（Artificial Intelligence，AI）是当前科学技术中的一门前沿学科，它是研究如何构造智能机器（智能计算机）或智能系统，使之能够模拟、延伸、扩展人类智能的学科。人工智能的研究范畴不只局限于计算机科学和技术，同时也涉及心理学、认知科学、思维科学、信息科学和系统科学等多种学科。人工智能从 1956 年诞生以来，经过 40 年的发展，取得了一定成就。总体来说，人工智能分为两大类：一类是符号智能，一类是计算智能。符号智能是以知识为基础，通过推理进行问题求解。计算智能是以数据为基础，通过训练建立联系，进行问题求解，包括人工神经网络、遗传算法、蚁群算法、模糊系统等。其中人工神经网络具有分



布、并行、自组织、自学习等特性，为人们在利用机器加工处理信息方面提供了一种全新的方法和途径。

智能制造的核心含义是指用计算机实现机器智能来代替或延伸制造环境中人的部分智能，以减轻人类制造专家部分繁重的脑力劳动负担，并提高制造系统的柔性、精度和效率。如果将体现在制造系统各环节中智能加工技术与制造环境中人的智能以柔性方式集成起来，并贯穿于制造过程中，这就是智能制造系统。因此，智能制造系统是一个以高度集成化、信息化、柔性化、精密化为特征的高度自动化的制造系统。

美国是智能制造思想的发源地之一，美国政府高度重视智能制造，将其视为21世纪占领世界制造技术领先地位的基石。欧共体国家也联合实施了“Future Generation Manufacturing System（FGMS）”计划，即智能制造计划。由于美、日、欧都将智能制造视为21世纪的制造技术和尖端科学，并认为是国际制造业科技竞争的制高点，所以他们在该领域的科技协作频繁，参与研究计划的各国制造业力量庞大，大有主宰未来制造技术的趋势。在这样的环境下，我国只有开发出具有中国特色的智能制造系统，提高企业的经济效益，方能在21世纪制造业中争得更多的竞争机会。

开发电火花线切割CAD/CAM、线切割专家库和人工智能软件。在上述各模块开发利用的基础上，利用嵌入式PC机及其开放式数控系统所创造的条件，建立电火花线切割CAD/CAM集成系统、专家知识库和人工智能系统，并使其商品化，以全面提高我国电火花线切割加工的自动化程度及工艺水平。

电火花线切割机床与其他机床相比，操作难度大，加工中的影响因素较多，同时由于电火花线切割加工时间长，一般电火花线切割机床都要求昼夜加工，无人化操作的要求也非常强烈，因此如何实现高度自动化一直是电火花线切割加工技术研究中的一个重要问题。而机器智能加工成为提高电火花线切割机床自动化水平的重要方法。当前，智能加工技术成为全球制造技术研究的热点，它主要利用20世纪60年代以来人工智能技术的研究成果，如符号人工智能技术及人工神经网络、专家系统、模糊逻辑理论、遗传算法技术以及它们之间互相渗透而形成的计算智能技术。通过这些人工智能技术对制造知识进行集成并建立一系列的智能数据库，并根据制造工程的基本准则，由机器来感知外部环境，从而分析和推理求解的问题，生成相应的解决策略信息，以此来指导和控制制造过程，使制造系统能模仿制造专家的技能进行生产，实现无人干预的而又在最优状态下的高效、高质量生产。

对于电火花成形加工来说，人工智能范畴内的适应控制是机床自主无人看管运行的关键，是几代操作者经验的总结，也是在大量工艺实验基础上按电火花成形加工机理研究和工艺规律建模的高技术成果。只要加工一开始，就需不断地进行火花间隙的检测、放电状态的判断和及时做出相应的调整，随后再检测调整的效果。如此不断周而复始的循环，一直保证加工的正常和稳定。为此，要研究开发新的适应控制系统，使之在两个层次里进行检测，一是逐个脉冲检测，不放过一个有害脉冲；二是在脉冲波形类型鉴别统计的基础上和伺服进给速度变化的规律中作出长期预测，实施前瞻控制。所需进行的判断和决策大致可在三个方面：①集中放电的长度是否在设定的成套参数规定的范围内，在起弧的风险和加工效率之间作出选择，是不是切掉一些脉冲；② 加工中使用的脉冲能量和实际放电面积之比，即电流密度是否在成套参数规定的范围之内；③ 在加工效率和电极损耗之间作出选择，要不要增加电流峰值，有没有搭桥短路，要不要清扫脉冲。

由上可知，机器智能加工是将用计算机实现机器智能来代替或延伸制造环境中人的部分智能，以减轻人类制造专家部分繁重的脑力劳动负担，并提高制造系统的柔性、精度和效率。因此，以人工智能理论为指导，以高性能计算机为平台，充分利用日益发展的智能加工技术来明显提高电火花线切割加工机床的自动化水平，降低机床的操作难度和提高机床的加工性能，将成为新一代电火花线切割机床的一个必然趋势。当前，国内外的电加工研究人员正积极地将人工智能技术应用到电火花线切割加工中，并已取得了具有重要意义的成果。国内一些学者和研究人员在这方面作了大量的和有益的研究工作，主要包括电火花线切割放电间隙状态的识别研究、加工状态检测研究、断丝先兆及控制研究和伺服进给模糊控制研究等。研究的结果表明，智能化技术的应用是建立在强实时多任务的操作系统平台之上。

（2）加工参数的优化

特种加工过程中涉及的控制参数很多，如何根据加工要求，抓住主要矛盾，选择最合理的加工参数，是特种加工向智能化方向发展的途径之一。

以数控电火花线切割加工为例，它首先涉及一系列的电参数，如脉冲宽度、脉冲间隔、峰值电流等。对这些电参数进行优化选择设定具有重要的意义：可以大幅度地降低机床的操作难度，最大程度发挥机床的潜力，获得最佳的加工工艺指标等。

比如在一定的表面粗糙度的要求下，把寻求最大的切割速度作为优化的目标，即在满足表面粗糙度要求的前提下，尽可能提高切割速度，减小表面粗糙度，改善表面质量，就是加工参数优化的一个实例。

要实现加工参数的优化选取，首先要选择相应的模型，然后输入加工条件，如待加工工件的的厚度、允许的最大表面粗糙度，系统经过分析运算就能得到最优的加工参数。参数优化的关键是要对特种加工的工艺规律进行深入细致的研究，然后建立电参数和工艺指标之间的关系模型，获取最佳的加工工艺指标的电参数优化算法。常用的算法有：

1）穷举算法　算法简单，有较好的适用性。

2）模拟退火算法　易获得全局最优解，但计算时间过长。

3）BP神经网络算法　该算法具有自学习功能，只要给出适当的网络结构，通过对样本数据的学习确定网络各层单元之间的权值来建立模型。

用户首先要选择合适的加工模型，然后输入加工参数（工件厚度、脉冲宽度、脉冲间隔和峰值电流），即可获得模型预测的加工工艺指标（切割速度和表面粗超度）。显然参数优化的最明显效益就是大大提高加工效率。

（3）模糊控制技术

模糊控制技术是在模糊集合论和模糊逻辑推理等理论基础上发展起来的计算机控制技术。自从20世纪60年代中期以来，首先由美国的L.A.Zadeh和E.H.Mamdani等人分别在模糊集合论以及模糊控制上进行了开创性的工作，模糊控制技术研究逐渐发展成为特具吸引力和富有成果的一个领域。同建立在精确数学模型的经典控制理论和现代控制理论相比，模糊控制更适合于多输入非线性、时变或具有高度不确定性的系统的控制。模糊控制器的规则设计可充分利用熟练操作人员及专家长期积累的经验。此外，现在已将自适应和学习能力引入到模糊控制中，使模糊控制规则、隶属函数和模糊量化在控制中可自动调整和完善，可以实现对复杂过程对象的有效控制。模糊控制的这些特性非常适合电火花加工的控制。目前模糊控制技术已经运用到电火花成形机床的加工控制系统中，日本的Sodick和三菱公司先后研制出基于模糊控制的电火花成形机床，机床加工性能得到了显著提高。



2.5　特种加工技术向集成化方向发展

各种特种加工都有其特殊的功效和作用，有些特种加工技术和方法之间就有很多共性、共通和互补之处。特种加工技术向集成化方向发展，就是把那些具有共性、共通和互补的特种加工技术和方法综合集成起来，使之发挥更大的作用和功效，例如，基于电场控制、溶解与切削相结合的复合加工技术，能够实现高效光整、高效精密模具成形加工，或光整及精密模具成形的一体化加工。

一般而言，细砂轮精密磨削加工精度高，但砂轮堵塞不易修整，加工曲面时砂轮损耗补偿也困难，且磨削力大，被加工表面易产生变质层，影响零件的表面质量；相比之下，电化学溶解加工精度虽低，但效率高，不存在工具损耗且无切削力，被加工零件表面质量好；而散粒体研磨由于加工压力容易控制，因此加工表面质量好，但整形能力差，且效率低。因此，以钝性工作液为纽带，结合电场控制策略，探索这些工艺的复合方法，以充分发挥其各自的长处，可发展出复杂曲面形状和光整一体化加工技术。具体包括电化学机械复合加工技术，化学机械加工技术，超声放电复合加工技术，时变场控制、磁场辅助的电化学及电化学机械复合加工技术，时变场控制的电解在线修整砂轮磨削加工技术，时变场控制电化学及磁粒研磨的复合加工技术等。

再如，基于 RP 技术的特种加工技术，以及面向 RP 技术的特种加工工艺组合技术同样也是一种技术上的集成。快速成形技术已成为模具制造的有效手段，正以其特有的制造哲理深刻地变革着模具制造领域，未来的模具制造体系必然综合材料增长制造和去除加工两种原理，以实现模具零件的快速制造，使特殊材料（如功能梯度材料）零件的直接制造成为可能，使得人们长期以来设想的按力学、电磁学性能来设计制造新材料零件变为现实。应该探索快速成形技术与电铸、电弧喷涂、等离子喷涂、等离子熔射成形、浇注、精密铸造、电火花等特种加工方法的组合工艺技术，为特殊性能材料零件和金属模具的快速制造提供崭新的技术手段。

编写：齐从谦（同济大学）
王至尧（中国航天科技集团 502 所）



参考文献

1 刘晋春，赵家齐．特种加工．北京：机械工业出版社，1995
2 齐从谦．制造业信息化导论．北京：中国宇航出版社，2003
3 罗均，谢少荣，龚振邦．面向 MEMS 的微细加工技术．电加工与模具，2001（5）：1～6
4 徐小兵，毛利尚武．日本电火花加工技术的发展动态．电加工与模具，2003（1）：1～3
5 余承业．航空制造工程手册：特种加工分册．北京：航空工业出版社，1993
6 朱荻．纳米技术与特种加工．电加工与模具，2002（2）：1～5
7 陈济抡．特种加工技术在航天发动机制造中的应用．电加工与模具，2003（2）：13～15
8 徐家文，王建业，田继安．21 世纪电解加工的发展与应用．电加工与模具，2003（2）：1～5
9 沈洪．EDM 技术热点问题研讨．机械与金属，2003（3/6）：73～79
10 李明奇，李明辉．WEDM－HS 加工质量控制系统框架及其关键技术．第三届模具实用制造技术交流年会，2003
11 甘屹，齐从谦．WEDM 数控系统的特点、发展与创新．电加工与模具，2003（2）：5～9
12 甘屹，齐从谦．模具企业动态联盟中的敏捷协同加工链建模．电加工与模具，2003（1）：33～36
13 刘立兵，朱国锋，李明奇．嵌入式 Linux 与现代模具加工数控设备．电加工与模具，2003（2）：1～5
14 齐从谦．网络化制造体系架构及其共性关键技术．中国制造业信息化，2003（8）：10～14
15 甘屹，齐从谦．模具制造网络化中企业动态联盟的建模及其关键技术．中国制造业信息化，2003（8）：87～91
16 王运赣．快速成形技术．武汉：华中理工大学出版社，1999
17 伍俊．电火花线切割智能加工系统的关键技术研究．（上海交通大学博士论文）．2001
18 楼乐明．电火花加工计算机仿真研究．（上海交通大学博士论文）．2000
19 刘立兵．基于 Linux 的电火花线切割数控系统的研究．（上海交通大学博士论文）．2003



第 2 篇

材料电火花成形加工技术

主　编　刘晋春　白基成　郭永丰
主　审　赵家齐
副主编　曹凤国
编　写　蒋亨顺　伏金娟　邹丽芸　丁小瑜
孙昌树　山昌祝　叶　军　孟庆国
耿春明　王振龙　杨晓东　曹国辉
刘　华　刘晋春　赵家齐　白基成
郭永丰　曹凤国
审　稿　中国材料工程大典编委会

中国机械工程学会
中国材料研究学会
中国材料工程大典编委会


蓝天CAD论坛
CNCAD.NET



第1章　概　　述

1　电火花加工的特点

1）适合于难切削材料的加工　由于加工中材料的去除是靠放电时的电热作用实现的，材料的可加工性主要与材料的导电性及其热学特性，如熔点、沸点（气化点）、比热容、热导率、电阻率等有关，而几乎与其力学性能（硬度、强度等）无关。这样可以突破传统切削加工对刀具的限制，实现用软的工具加工硬、韧的工件，甚至可以加工像聚晶金刚石、立方氮化硼一类的超硬材料。目前电极材料多采用纯铜或石墨，因此工具电极较容易加工制造。

2）可以加工特殊及复杂形状的零件　由于加工中工具电极件不直接接触，没有机械加工的切削力，因此适宜加工低刚度工件及微细加工。由于可以简单地将工具电极的形状复制到工件上，因此特别适用于复杂表面形状工件的加工，如复杂型腔模具加工等。数控技术的采用使得用简单的电极加工复杂形状工件也成为可能。

3）易于实现加工过程自动化　由于是直接利用电能加工，而电能、电参数较机械量易于实现数字控制、适应控制、智能化控制和无人化操作等。

4）可以改进结构设计，改善结构的工艺性　可以将拼镶结构的硬质合金冲模改为用电火花加工的整体结构，减少了加工工时和装配工时，延长了使用寿命。喷气发动机中的叶轮，采用电火花加工后可以将拼镶、焊接结构改为整体叶轮，既大大提高了工作可靠性，又大大减小了体积和质量。

电火花加工也有其一定的局限性，具体是：

1）只能用于加工金属等导电材料　不像切削加工那样可以加工塑料、陶瓷等绝缘的非导电材料。但近年来研究表明，在一定条件下也可加工半导体和聚晶金刚石等非导体超硬材料。

2）加工速度一般较慢　因此通常安排工艺时多采用切削来去除大部分余量，然后再电火花加工，以求提高生产率。但最近的研究成果表明，采用特殊水基不燃性工作液进行电火花加工，其粗加工生产率不低于切削加工。

3）存在电极损耗　由于电火花加工靠电、热来蚀除金属，电极也会遭受损耗，而且电极损耗多集中在尖角或底面，影响成形精度。但最近的机床产品在粗加工时已能将电极相对损耗比降至1%，甚至更小。

4）最小角部半径有限制　一般电火花加工能得到的最小角部半径略大于加工放电间隙（通常为0.02～0.30 mm），若电极有损耗或采用平动头加工，则角部半径还要增大。但近年来的多轴数控电火花加工机床，采用 X、Y、Z 轴数控摇动加工，可以棱角分明地加工出方孔、窄槽的侧壁和底面。

5）加工表面有变质层甚至微裂纹　由于电火花加工具有许多传统切削加工所无法比拟的优点，因此其应用领域日益扩大，目前已广泛应用于机械（特别是模具制造）、宇航、航空、电子、电机、电器、精密微细机械、仪器仪表、汽车、轻工等行业，以解决难加工材料及复杂形状零件的加工问题。加工范围已达到小至几十微米的小轴、孔、缝，大到几米的超大型模具和零件。

2　电火花加工的工艺类型及适用范围

按工具电极和工件相对运动的方式和用途的不同，电火花加工大致可分为电火花穿孔成形加工、电火花线切割、电火花同步共扼回转加工、电火花高速小孔加工、电火花表面强化与刻字六大类。前五类属电火花成形、尺寸加工，是用于改变工作形状和尺寸的加工方法；后者则属表面加工方法，用于改善或改变零件表面性质。以上以电火花穿孔成形加工和电火花线切割应用最为广泛。表2.1-1为总的分类情况及各加工方法的特点和用途。

表2.1-1　电火花加工的工艺类型及适用范围

类别	工艺类型	特　点	适用范围	备　注
1	电火花穿孔成形加工	1）工具和工件间主要只有一个相对的伺服进给运动 2）工具为成形电极，与被加工表面有相同的截面和相应的形状	1）穿孔加工：加工各种冲模、挤压模、粉末冶金模、各种异形孔及微孔等 2）型腔加工：加工各类型腔模及各种复杂的型腔工件	约占电火花机床总数的30%，典型机床有DK7125、D7140等电火花穿孔成形机床
2	电火花线切割加工	1）工具电极为顺电极丝轴线垂直移动着的线状电极 2）工具与工件在两个水平方向同时有相对伺服进给运动	1）切割各种冲模和具有直纹面的零件 2）下料、截割和窄缝加工	约占电火花机床总数的60%，典型机床有DK7725、DK7740数控电火花线切割机床
3	电火花内孔、外圆和成形磨削	1）工具与工件有相对的旋转运动 2）工具与工件间有径向和轴向的进给运动	1）加工高精度、表面粗糙度值小的小孔，如拉丝模、挤压模、微型轴承内环、钻套等 2）加工外圆、小模数滚刀等	约占电火花机床总数的3%，典型机床有D6310电火花小孔内圆磨床等
4	电火花同步共轭回转加工	1）成形工具与工件均作旋转运动，但二者角速度相等或成整倍数，相对应接近的放电点可有切向相对运动速度 2）工具相对工件可作纵、横向进给运动	以同步回转、展成回转、倍角速度回转等不同方式，加工各种复杂型面的零件，如高精度的异形齿轮，精密螺纹环规，高精度、高对称度、表面粗糙度值小的内、外回转体表面等	约占电火花机床总数不足1%，典型机床JN－2、JN－8内外螺纹加工机床



续表 2.1-1

类别	工艺类型	特　点	适用范围	备　注
5	电火花高速小孔加工	1）采用细管（> ϕ0.3 mm）电极，管内冲入高压水基工作液 2）细管电极旋转 3）穿孔速度很高（30 ~ 60 mm/min）	1）线切割预穿丝孔 2）深径比很大的小孔，如喷嘴等	约占电火花机床总数的 2%，典型机床有 D703A 电火花高速小孔加工机床
6	电火花表面强化、刻字	1）工具在工件表面上振动，在空气中火花放电 2）工具相对工作移动	1）模具刃口，刀、量具刃口表面强化和镀覆 2）电火花刻字、打印记	约占电火花机床总数的 1% ~ 2%，典型设备有 D9105 电火花强化机等

在上述六种电火花加工工艺技术中，本章重点进述电火花穿孔和成形加工等技术。至于电火花线切割加工技术，则将在本卷第 3 篇“数控电火花线切割技术”中论述。

3　电火花加工对材料可加工性和结构工艺性等的影响

电火花加工工艺的特点以及逐渐广泛的应用，引起了机械制造工艺技术领域内的许多变革，例如对材料的可加工性，工艺路线的安排，新产品的试制过程，产品零件设计的结构及零件结构工艺性好坏的衡量标准等产生了如下一系列的影响。

1）提高了材料的可加工性　以往认为金刚石、硬质合金、淬火钢、石英、玻璃、陶瓷等是很难加工的。现在已经广泛采用金刚石、聚晶（人造）金刚石制造的刀具、工具、拉丝模具，可以用电火花、电解、激光等多种方法来加工它们。材料的可加工性不再与硬度、强度、韧性、脆性等成直接的比例关系，对电火花、线切割加工而言，淬火钢比未淬火钢更易加工。

2）改变了零件的典型工艺路线　以往除磨削外，其他切削加工、成形加工等必须安排在淬火热处理工序之前，这是一切工艺人员决不可违反的工艺准则。电火花加工的出现，改变了这种一成不变的程序格式。由于它基本上不受工件硬度的影响，而且为了免除加工后再淬火引起热处理变形，一般都先淬火而后加工。最为典型的是电火花线切割加工、电火花成形加工和电解加工等必须先淬火后加工。

电火花加工的出现还对工序的“分散”和“集中”产生了影响。以加工齿轮、连杆等型腔锻模为例，由于电加工时没有显著的切削力，机床、夹具、工具的强度、刚度不是主要矛盾。因此，即使是较大的、复杂的加工表面，往往可用一个复杂工具、简单的运动轨迹、一次安装、一道工序加工出来，这样做工序比较集中。

3）改变了试制新产品的工序和工艺　采用光电、数控电火花线切割，可以直接加工出各种标准和非标准直齿齿轮（包括非圆柱齿轮、非渐开线齿轮），微电机定子、转子硅钢片，各种变压器铁心，各种特殊、复杂的二次曲面体零件。这样可以省去设计和制造相应的刀、夹、量、模具及二次工具，大大缩短了试制周期。

4）电加工对产品零件的结构设计带来很大的影响　例如，花键孔、轴，枪炮膛线的齿根部分，设计上为了减少应力集中，常常设计成小圆角，但拉削加工时刀齿做成圆角对排屑不利，容易磨损，刀齿只能设计与制造成清棱清角的齿根，而用电解加工时由于存在尖角变圆现象，非采用小圆角的齿根不可。又如各种复杂冲模如山形硅钢片冲模，过去由于不易制造，往往采用拼镶结构，采用电火花、线切割加工后，即使是硬质合金的模具或刀具，也可做成整体结构。喷气发动机涡轮也由于电加工而可采用整体结构。

5）改变了传统的结构工艺性好与坏的评判准则　过去对方孔、小孔、弯孔、窄缝等被认为是工艺性很“差”的典型，对工艺、设计人员是非常“忌讳”的，有的甚至是“禁区”。电加工的采用改变了这种现象。对于电火花穿孔、电火花线切割工艺来说，加工方孔和加工圆孔的难易程度是一样的。喷油嘴小孔、喷丝头小异形孔、涡轮叶片大量的小冷却深孔、窄缝及静压轴承、静压导轨的内油囊型腔等，采用电加工后变难为易了。过去淬火前忘了钻定位销孔、铣槽等工艺，淬火后这种工件只能报废，现在则大可不必，可用电火花打孔、切槽补救。相反有时为了避免淬火开裂、变形等影响，故意把钻孔、开槽等工艺安排在淬火之后。

编写：刘晋春（哈尔滨工业大学）
赵家齐（哈尔滨工业大学）

第 2 章　电火花加工的基本原理和机理

1　电火花加工常用术语和符号

1980 年前后，我国电加工学会参照国际电加工界的电火花加工术语、定义和符号，制订了我国电火花加工的术语、定义和符号（试行稿），以有利于国内外学术交流、图书出版和学生教育培养等。现将电火花加工中常用的主要名词术语和符号摘录如下。

1）工具电极　电火花加工用的工具，因其是火花放电时电极之一，故称工具电极，有时简称工具或电极（见图 2.2-1）。

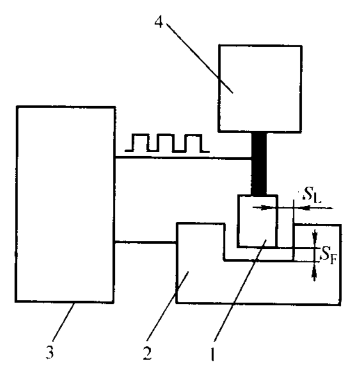


图 2.2-1　电火花加工示意图

1—工具电极；2—工件；3—脉冲电源；4—伺服进给系统

2）放电间隙　是指加工时工具和工件之间产生火花放电的一层距离间隙。在加工过程中，则称为加工间隙 S，它的大小一般在 0.01 ~ 0.5 mm 之间，粗加工时间隙较大，精加工时则较小。加工间隙又可分为端面间隙 S'_F 和侧面间隙 S_L，S_F 稍小于 S_L，下部的 S_L 稍小于上部的 S_L。

3）脉冲电源　是电火花加工设备的主要组成部分之一。它给放电间隙提供一定能量的电脉冲，是电火花加工时的能量来源，常简称电源。最早用的是 RC 线路脉冲电源，稍后又有电子管脉冲电源、闸流管脉冲电源，现在广泛采用的是晶休管脉冲电源和可控硅脉冲电源。

4）伺服进给系统　是电火花加工机床的重要组成部分，用于工具电极伺服进给、自动调节，使工具电极和工件在加工过程中保持一定的放电间隙（见图 2.2-1）。我国早期电火花加工机床中的伺服进给系统是液压式的，靠液压缸和活塞产生进给运动，用喷嘴-挡板电机械转换器或电液压伺服阀（后者用于精密、高档电火花加工机床）来控制液压缸、活塞的运动速度和方向，实现伺服进给。现在采用步进电动机或大力矩、宽调速直流电动机以及交流伺服电动机作为伺服进给系统。

5）工作液介质　电火花加工时，工具和工件间的放电间隙必须浸泡在一定绝缘性能的液体介质中，此液体介质称为工作液介质或简称工作液。一般将煤油作为电火花加工时的工作液。

6）电蚀产物　是指电火花加工过程中被电火花蚀除下来的产物。狭义而言，电蚀产物指工具和工件表面被蚀除下来的金属微粒小屑和煤油等工作液在高温下分解出来的炭黑，常称为加工屑。广义而言，电蚀产物还包括煤油在高温下分解出来的气体氢、甲烷等小气泡。

7）电规准电参数　指电火花加工时选用的电加工用量、电加工参数，主要有脉冲宽度 t_i、脉冲间隔 t_o、峰值电压 $\hat{u}_i$、峰值电流 $\hat{i}_e$ 等脉冲参数（见图 2.2-2 及以下解释），这些脉冲参数在每次加工时必须事先选定。日本等翻译过来的说明书中把电规准参数称为加工条件。

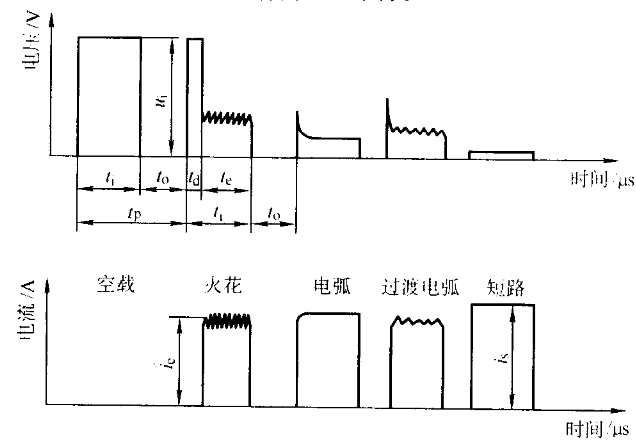


图 2.2-2　脉冲参数与脉冲电压、电流波形

8）脉冲宽度 t_i（μs）　简称脉宽，日本及英美常用 t_{on} 或 τ_{on} 表示。它是加到工具和工件的电间隙两端的电压脉冲的持续时间（见图 2.2-2）。为了防止电弧烧伤，电火花加工只能用断断续续的脉冲电压波。粗加工时可用较大的脉宽，$t_i > 100$ μs；精加工时只能用较小的脉宽，$t_i < 50$ μs。

9）脉冲间隔 t_o（μs）　简称脉间或间隔，也称脉冲停歇时间。日本及英美常用 t_{off} 或 τ_{off} 表示。它是两个电压脉冲之间的间隔时间（见图 2.2-2）。间隔时间过短，放电间隙来不及消电离和恢复绝缘，容易产生电弧放电，烧伤工具和工件；脉间选得过大将降低加工生产率。加工面积、加工深度较大时，脉间也应稍大。

10）放电时间（电流脉宽）t_e（μs）　是工作液介质击穿后放电间隙中流过放电电流的时间，亦即电流脉宽，它比电压脉宽稍小，差一击穿延时 t_d（见图 2.2-2）。t_i 和 t_e 对电火花加工的生产率、表面粗糙度和电极损耗等有很大影响，但实际起作用的是电流脉宽 t_e。由于每个脉冲的电压脉宽 t_i 是不变的，而每个脉冲击穿后的电流脉宽是变化的，因此在选择电规准时常用电压脉宽 t_i，只有等电流脉冲电源时用 t_e。从图 2.2-2 的示波器图形上可以看出，只有在火花放电时间内，电压波形和电流波形上才会有较浓的锯齿状高频振荡的波形（高频分量），这是区别火花和电弧的重要特征。

11）击穿延时 t_d（μs）　从间隙两端加上脉冲电压后，一般均要经过一小段延续时间 t_d，工作液介质才能概率性地被击穿放电，此时间称击穿延时（见图 2.2-2）。它与平均放电间隙大小有关，工具欠进给时，平均放电间隙偏大，平均击穿延时 t_d 就大，反之工具过进给时，放电间隙变小，t_d 也就小。

12）脉冲周期 t_p（μs）　一个电压脉冲开始到下一个电压脉冲开始之间的时间称脉冲周期，显然 $t_p = t_i + t_o$（见图 2.2-2）。

13）脉冲频率 f_p（Hz）　是指单位时间（1 s）内电源发出的脉冲个数。显然，它与脉冲周期 t_p 互为倒数，即 $f_p = \frac{1}{t_p}$。

14) 脉宽系数 τ　是脉冲宽度 t_i 与脉冲周期 t_p 之比，其计算公式为 $\tau=\frac{t_i}{t_p}=\frac{t_i}{t_i+t_o}$。

15) 占空比 φ　是脉冲宽度 t_i 与脉冲间隔 t_o 之比，$\varphi=\frac{t_i}{t_o}$。粗加工时，占空比可较大，$\varphi=(10:1)\sim(2:1)$；精加工时应较小，$\varphi=(1:1)\sim(1:10)$，否则放电间隙来不及消电离恢复绝缘，容易引起电弧放电。

16) 开路电压（空载电压）或峰值电压 $\hat{u}_i$　是间隙开路时电极间的最高电压，等于电源的直流电压。一般晶体管方波脉冲电源的峰值电压 $\hat{u}_i=80\sim100$ V，高低压复合脉冲电原的高压峰值电压为 175～300 V。峰值电压高时，放电间隙大，生产率高，但成型复制精度稍差。

17) 火花维持电压　是每次火花击穿后，在放电间隙上火花放电时的维持电压，一般在 25 V 左右，但它实际是一个高频振荡的电压（见图 2.2-2）。电弧的维持电压比火花的维持电压低 5 V 左右，高频振荡频率较低，一般示波器上观察不到高频成分，观察到的是一水平亮线。过渡电弧的维持电压则介于火花和电弧之间（见图 2.2-2）。

18) 加工电压或间隙平均电压　是指加工时电压表上指示的放电间隙两端的平均电压，它是多个开路电压、火花放电维持电压、短路和脉冲间隔等零电压的平均值。在正常加工时，加工电压在 30～50 V，它与占空比、预置进给量等有关。占空比大、欠跟踪、间隙偏开路，则加工电压偏大；占空比小、过跟踪或预置进给量小（间隙偏短路），加工电压即偏小。

19) 加工电流 I　是加工时电流表上指示的流过放电间隙的平均电流。精加工时小，粗加工时大；间隙偏开路时小，间隙合理或偏短路时则大。

20) 短路电流 I_s　是放电间隙短路时（或人为短路时）电流表上指示的平均电流（因为短路时还有停歇时间内无电流）。它比正常加工时的平均电流要大 20%～40%。

21) 峰值电流 $\hat{i}_e$　是间隙火花放电时脉冲电流的最大值（瞬时），日本、英国、美国常用 I_p 表示（见图 2.2-2）。虽然峰值电流不易直接测量，但它是实际影响生产率、表面粗糙度等指标的重要参数。在设计制造脉冲电源时，每一功率放大管串联限流电阻后的峰值电流是预先选择计算好的。为了安全，每个 50 W 的大功率晶体管选定的峰值电流约为2～3 A，电源说明书中也有说明，可以按此选定粗、中、精加工时的峰值电流（实际上是选定用几个功率管进行加工）。

22) 短路峰值电流 $\hat{i}_s$　是间隙短路时脉冲电流的最大值（瞬时值，亦即不考虑停歇时间）（见图 2.2-2）。它比峰值电流 $\hat{i}_e$ 要大 20%～40%，与短路电流 I_e 相差一脉宽系数的倍数，$\hat{i}_s\tau=I_s$。例如测得某规准时的短路电流 $I_s=5$ A，查得加工时选用的占空比 $\varphi=\frac{t_i}{t_o}=100:50$，脉宽系数 $\tau=\frac{t_i}{t_p}=\frac{t_i}{t_i+t_o}=\frac{100}{100+50}=\frac{100}{150}=\frac{2}{3}$，由此可以算出：$\hat{i}_e=\frac{I_s}{\tau}=5\times\frac{3}{2}$ A $=7.5$ A。

23) 正、负极性加工　加工时以工件为准，工件接脉冲电源正极（高电位端），称正极性加工；反之，加工件接电源负极（低电位端），则称负极性加工。高生产率、低损耗粗加工时，常用负极性长脉宽加工。

24) 放电状态　指电火花加工时放电电隙内每一脉冲放电时的基本状态。一般分为五种放电状态和脉冲类型（见图 2.2-2）。

① 开路（空载脉冲）　放电间隙没有击穿，间隙上有大于 50 V 的电压，但间隙内没有电流流过，为空载状态（$t_d=t_i$）。

② 火花放电（工作脉冲，或称有效脉冲）　间隙内绝缘性能良好，工作液介质击穿后能有效地抛出、蚀除金属。波形特点是：电压上有 t_d，t_e 和 i_e 波形上有高频振荡的小锯齿波形。

③ 短路（短路脉冲）　放电间隙直接短路相接，这是由于伺服进给系统瞬时进给过多或放电间隙中有电蚀产物搭接所致。间隙短路时电流较大，但间隙两端的电压很小，没有蚀除加工作用。

④ 电弧放电（稳定电弧放电）　由于排屑不良，放电点集中在某一局部而不分散，局部热量积累，温度升高，为恶性循环，此时火花放电就成为电弧放电。由于放电点固定在某一点或某局部，因此称为稳定电弧，常使电极表面结炭、烧伤。波形特点是 t_d 和高频振荡的小锯齿波基本消失。

⑤ 过渡电弧放电（不稳定电弧放电，或称不稳定火花放电）　过渡电弧放电是正常火花放电与稳定电弧放电的过渡状态，是稳定电弧放电的前兆。波形特点是击穿延时很小或接近于零，仅成为一尖刺，电压电流波上的高频分量变低成稀疏的锯齿形。

以上各种放电状态在实际加工中是交替、概率性地出现的（与加工规准和进给量等有关），甚至在一次单脉冲放电过程中，也可能交替出现两种以上的放电状态。

25) 加工速度 v_w　是单位时间（min）内从工件上蚀除加工下来的金属体积（mm³），用 v_m 表示，也称加工生产率。大功率电源粗加工时 $v_w>500$ mm³/min，但电火花精加工时，通常 $v_w<20$ mm³/min。

26) 加工效率 V_{sp}　是每安培加工电流每分钟蚀除加工掉的工件金属体积或质量（我国常用体积）。这样可以抛开电源功率大小的影响，来衡量评定不同的脉冲电源的加工速度和工艺水平。一般较好的脉冲电源的加工效率 $V_{sp}\geqslant10$ mm³/（A·min），国外先进水平可达 $V_{sp}=10\sim15$ mm³/（A·min）。

27) 损耗速度 v_E　是单位时间（min）内工具电极的损耗量（体积和质量）。

28) 相对损耗或损耗比（损耗率）θ　是工具电极损耗速度和工件加工速度之比值，并以此来综合衡量工具电极的耐损耗度和加工性能。在实际生产中，常用体积相对损耗比

$$\theta=\frac{V_E}{V_W}\times100\%$$

在等截面电火花穿孔时，也可用长度相对损耗比

$$\theta_L=\frac{\Delta L_E}{L_W}$$

式中，L_W 为电极进给距离；L_E 为电极损耗长度。

29) 低损耗加工　指相对损耗比 $\theta\leqslant1\%$ 时的电火花加工。一般用纯铜或石墨电极负极性加工钢，并采用长脉宽粗加工时可实现低损耗加工。

30) 无损耗加工　指相对损耗比 $\theta\leqslant0.1\%$ 的电火花加。一般在负极性长脉宽加工时充分利用工具电极正极表面吸附、镀覆一层游离炭黑膜才能实现。但过厚吸附炭黑膜，会造成“负损耗”，反而影响精度。

31) 面积效应　指电火花加工时，随加工面积大小变化而加工速度、电极损耗比和加工稳定性等指标随之变化的现象。一般加工面积过大或过小时，工艺指标通常降低，这是由“电流密度”过小或过大引起的。

32) 深度效应　随着加工深度增加而加工速度和稳定性降低的现象称深度效应。这主要是电蚀产物积聚、排屑不良等引起的。



33）伺服参考电压 S_V　是指电火花加工伺服进给时，事先设置的一个参考电压 S_V（0～50 V）。用它与加工时的平均间隙电压 U 作比较，$S_V > U$，则主轴向上回退；反之则向下进给。因此，S_V 大，则平均放电间隙愈大，反之则小。

34）有效脉冲频率 f_e　又称工作（火花）脉冲频率，即每秒钟发生的有效火花放电的次数。

35）脉冲利用率 λ　又称脉冲个数利用率，是有效脉冲频率 f_e 与脉冲频率 f_p 之比，即

$$\lambda = \frac{f_e}{f_p}$$

亦即单位时间内有效火花脉冲个数与该单位时间内的总脉冲个数之比。

36）相对放电时间率 ψ　又称相对脉冲时间利用率或放电时间比，即火花放电时间 t_e 与脉冲宽度 t_i 之比

$$\psi = \frac{t_e}{t_i}$$

37）平均相对放电时间率 φ　为一段时间内火花放电时间 t_e 总和与该段时间内脉冲宽度 t_i 总和之比，即

$$\varphi = \frac{\sum t_e}{\sum t_i}$$

因为电火花加工时放电状态检测装置很难测量单个脉冲宽度内的火花放电时间比 ψ，即使测得 ψ，也得取其平均值才能作为控制之用。

38）平均绝对放电时间率 Φ　在一段时间内电火花放电时间 t_e 的总和与该段时间之比，亦即与该段时间内脉冲周期 t_p 总和之比，即

$$\Phi = \frac{\sum t_e}{\sum t_p} = \frac{\sum t_e}{\sum (t_i + t_o)}$$

检测平均绝对放电时间率 Φ，并用它来控制电火花加工过程，可以不受脉冲间隔 t_o 的影响，因为在自适应控制过程中，脉冲间隔 t_o 是随时被调节变化的，而且粗、中、精不同的加工规准，脉冲间隔 t_o 的变化也很大。

2　电火花加工的基本原理

电火花加工又称放电加工（Electrical Discharge Machining，简称 EDM），是一种直接利用电能和热能进行加工的新工艺。电火花加工与金属切削加工的原理完全不同，在加工过程中，工具和工件并不接触，而是靠工具和工件之间不断的脉冲性火花放电，产生局部、瞬时的高温把金属材料逐步蚀除掉。由于放电过程中可见到火花，故称之为电火花加工，日本、英国、美国称之为放电加工，俄罗斯称之为电蚀加工。目前这一工艺技术已广泛用于加工淬火钢、不锈钢、模具钢、硬质合金等难加工材料；用于加工模具等具有复杂表面和有特殊要求的零件，在民用和国防工业中获得愈来愈多的应用，已成为切削加工的重要补充和发展。

电火花加工的原理是利用工具和工件（正、负电极）之间脉冲性火花放电时的电腐蚀现象来蚀除多余的金属，以达到对工件的尺寸、形状及表面质量预定的加工要求。电腐蚀现象早在 20 世纪初就被人们发现，例如在插头或电器开关触点开、闭时，往往产生火花而把接触表面烧毛，腐蚀成粗糙不平的凹坑而逐渐损坏。长期以来，电腐蚀一直被认为是一种有害的现象，人们不断地研究电腐蚀的原因并设法减轻和避免电腐蚀的发生。但事物都是一分为二的，只要掌握规律，在一定条件下可以把坏事转化为好事，把有害变为有用。1940 年前，前苏联科学院电工研究所拉扎连柯夫妇的研究结果表明，电火花腐蚀的主要原因是电火花放电时火花通道中瞬时产生大量的热，达到很高的温度，足以使任何金属材料局部熔化、气化而被蚀除掉，形成放电凹坑。这样，人们在研究抗电腐蚀办法的同时，开始研究利用电腐蚀现象对金属材料尺寸加工，终于在 1943 年拉扎连柯夫妇研制出利用电容器反复充电放电原理的世界上第一台实用化的电火花加工装置，并申请了发明专利，以后在生产中不断推广应用。拉扎连柯因此被评为前苏联科学院院士。

实践经验表明，要把有害的火花放电转化为有用的加工技术，必须做到以下几点：

1）使工具电极与工件被加工表面之间始终保持一定的放电间隙，这一间隙随加工条件而定，通常约为几微米到几百微米。如果间隙过大，极间电压不能击穿极间介质，因而不会产生火花放电；如果间隙过小，很容易形成短路接触，同样也不能产生火花放电。为此，在电火花加工过程中必须具有工具电极的自动进给和调节装置。

2）使火花放电为瞬时的脉冲性放电，并在放电延续一段时间后，停歇一段时间（放电延续时间一般为 10～1 000 μs）。这样才能使放电所产生的热量来不及传导扩散到其余部分，把每一次的放电点分别局限在很小的范围内；否则，像持续电弧放电那样，使放电点表面大量发热、熔化、烧伤，只能用于焊接或切割，而无法用作尺寸加工，故电火花加工必须采用脉冲电源。

3）使火花放电在工作液（例如煤油、皂化液或去离子水等）介质中进行。工作液介质必须具有较高的绝缘强度（10^3～10^7 Ω·cm），以有利于产生脉冲性的火花放电。同时，工作液介质还能把电火花加工过程中产生的金属小屑、碳黑等电蚀产物从放电间隙中悬浮排除出去，并且对工具电极和工件表面有较好的冷却作用。

以上问题的综合解决，是通过图 2.2-3 所示的电火花加工来实现的。工件 1 与工具 4 分别与脉冲电源 2 的两输出端相联接。自动进给调节装置 3（此处为电动机及丝杆、螺母、导轨）使工具和工件间经常保持一很小的放电间隙。当脉冲电压加到两极之间时，便在当时条件下相对某一间隙最小处或绝缘强度最低处击穿介质，在该局部产生火花放电，瞬时高温使工具和工件表面都蚀除掉一小部分金属，各自形成一个小凹坑，如图 2.2-4 所示。其中图 2.2-4a 表示单个脉冲放电后的电蚀坑，图 2.2-4b 表示多次脉冲放电后的电极表面。脉冲放电结束后，经过一段间隔时间（即脉冲间隔 t_o），使工作液恢复绝缘后，第二个脉冲电压又加到两极上，又会在当时极间距离相对最近或绝缘强度最弱处击穿 放电，又电蚀出一个小凹坑。这样随着相当高的频率，连续不断地重复放电，工具电极不断地向工件进给，就可将工具端面和

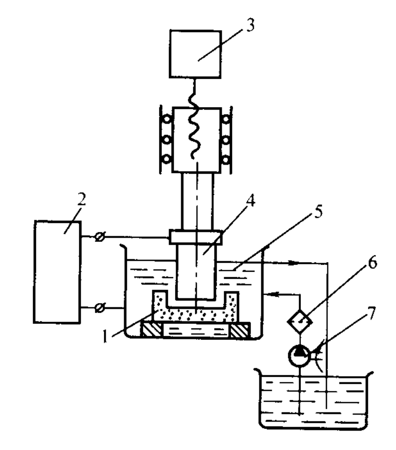


图 2.2-3　电火花加工原理示意图

1—工件；2—脉冲电源；3—自动进给调节装置；
4—工具；5—工作液；6—过滤器；7—工作液泵



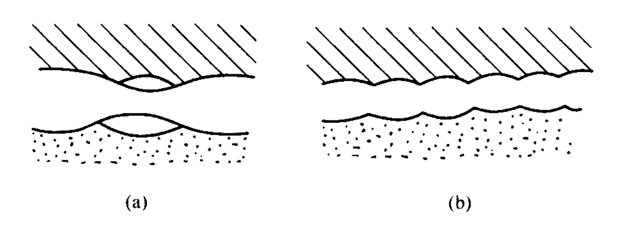


图 2.2-4 电火花加工表面局部放大图

横截面的形状复制在工件上，加工出所需要的和工具形状阴阳相反的零件，整个加工表面将由无数个小凹坑所组成。

3 电火花加工的机理

从大量实验资料来看，每次电火花腐蚀的微观过程都是电场力、磁力、热力、流体动力、电化学和胶体化学等综合作用的过程。这一过程大致可分以下四个连续阶段：极间介质的电离、击穿，形成放电通道；介质热分解、电极材料熔化、气化热膨胀；电极材料的抛出；极间介质的消电离。

(1) 极间介质的电离、击穿，形成放电通道

图 2.2-5 为矩形波脉冲放电时的电压（图 2.2-5a）和电流波形（图 2.2-5b）。当脉冲电压施加于工具电极与工件之间时（图 2.2-5 中 0～1 段和 0～2 段），两极之间立即形成一个电场。电场强度与电压成正比，与距离成反比，随着极间电压的升高或是极间距离的减小，极间电场也将随着增大。由于工具电极和工件的微观表面是凸凹不平的，极间距离又很小，因而极间电场强度是很不均匀的，两极间离得最近的突出点或尖端处的电场强度一般来说最大。

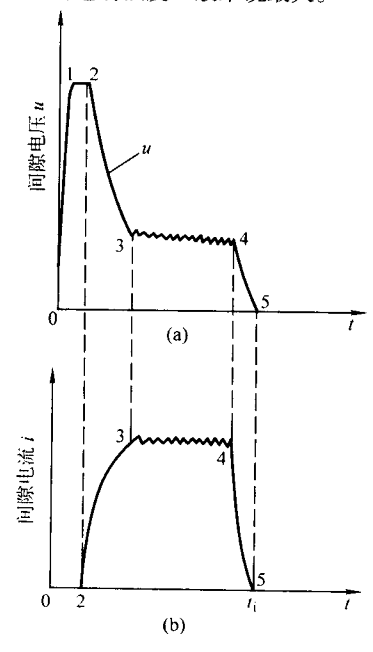


图 2.2-5 极电放电电压和电流波形
0～1—电压上升段；1～2—击穿延时；
2～3—电压下降、电流上升段；3～4—火花维持电压和维持电流；
4～5—电压、电流下降段

工作液介质中不可避免地含有某种杂质（如金属微粒、碳粒子、胶体粒子等），也有一些自由电子，使介质呈现一定的电导率。在电场作用下，这些杂质将使极间电场更不均匀，当负极表面某处的电场强度增加到 100 V/μm 左右时，就会产生场致电子发射，由负极表面向正极逸出电子。在电场作用下电子高速向正极运动，并撞击工作液介质中的分子或中性原子（在化学、物理中任何分子都是由一种或多种元素的原子组成的。任何原子都是由带正电荷的原子核和围绕原子核高速运动着的带负电荷的电子所组成，不同元素的原子有不同的电子数，但整个原子的正、负电荷都相等，因而是电中性的），产生碰撞电离，把最外层轨道上的负电子撞离出去，形成带负电的粒子（主要是电子）和带正电的粒子（原子核和轨道上剩余的电子构成的正离子），导致带电粒子雪崩式增多，使介质击穿而电阻率迅速降低，形成放电通道。这种由于电场强度增高引起电子发射形成的间隙击穿称为场致发射击穿。另有一种由于负极表面温度高，局部过热而引起大量电子发射形成的间隙击穿称为热击穿。电火花加工中，如果电极表面冷却不好，热击穿过多，易引起放电点集中而不分散，导致积炭而转为电弧放电。

从雪崩电离开始到建立放电通道的过程非常迅速，理论上仅需 0.1～0.01 μs，间隙电阻从绝缘状态迅速降低到几分之一欧姆，间隙电流迅速上升到最大值（几安到几百安）。由于通道直径很小，所以通道中的电流密度可高达 10^3～10^4 A/mm^2。间隙电压则由击穿电压迅速下降到火花维持电压（一般约为 20～30 V），电流则由 0 上升到某一峰值电流（图 2.2-5b 中 2～3 段）。如果间隙电路中导线有电感，或脉冲电源开关元件频率响应低，则上升、下降段都会不陡。

放电通道是由数量大体相等的带正电（正离子）和带负电粒子（电子）以及中性粒子（原子或分子）组成的等离子体。正、负带电粒子相向高速运动相互碰撞，产生大量的热，使通道温度相当高，但分布是不均匀的，从通道中心向边缘逐渐降低，通道中心温度可高达 10 000℃以上。电子流动形成的电流按电工学右手螺旋定则产生磁场，磁场又反过来对电子流产生向心的磁压缩效应，电子流动又同时受周围介质惯性动力压缩效应的作用，使通道瞬间扩展受到很大阻力，故放电开始阶段通道截面很小，而通道内由高温热膨胀形成的初始压力可达数十兆帕。高压高温的放电通道以及随后瞬时金属气化形成的气体（以后发展成气泡）急速扩展，产生一个强烈的冲击波向四周传播。在放电过程中，同时还伴随着一系列派生现象，其中有热效应、电磁效应、光效应、声效应及频率范围很宽的电磁辐射和爆炸冲击波等。

关于通道的结构，一般认为是单通道，即在一次放电时间内只存在一个放电通道；少数人认为可能有多通道，即在一次放电时间内可能同时存在几个放电通道，理由是单次脉冲放电后电极表面有时会出现几个电蚀坑。近期实验表明，单个脉冲放电时有可能出现多次击穿（即一个脉冲内间隙击穿后，有时产生短路或开路，接着又产生击穿放电）。另外，也出现通道受某些随机因素的影响而产生游动，因而在单个脉冲周期内先后会出现多个（或形状不规则）电蚀坑，但同一时间内只存在一个放电通道。因为晶体管脉冲电源小距离击穿通道后，间隙维持电压降至 20～30 V，不可能有足够的电场强度，同时再形成第二个放电通道（在大气中雷电高压大距离击穿放电时，可能同时有多个分支放电通道）。

(2) 介质热分解、电极材料熔化、气化热膨胀

极间介质一旦被电离、击穿，形成放电通道后，脉冲电源使通道间的电子高速奔向正极，正离子奔向负极。电能变成动能，动能通过碰撞又转变为热能。于是在通道内正极和负极表面分别成为瞬时热源，达到很高的温度。通道高温将工作液介质气化，进而热裂分解气化，如煤油等碳氢化合物工作液，在高温下裂解为氢气 H_2（约占 40%）、乙炔 C_2H_2（约占 30%）、甲烷 CH_4（约占 15%）、乙烯 C_2H_4（约占 10%）和游离炭黑等；水基工作液则热分解为 H_2、O_2 的分子甚至原子等。正负极表面的高温除使工作液气化、热分解气化外，也使金属材料熔化甚至沸腾气化，这些气化的工作



液和金属蒸气，瞬间体积猛增，在放电间隙内成为气泡，迅速热膨胀，就像火药、爆竹点燃后那样具有爆炸的特性。观察电火花加工过程，可以看到放电间隙间冒出气泡，工作液逐渐变黑，听到轻微而清脆的爆炸声。电火花加工主要靠热膨胀和局部微爆炸，使熔化、气化了的电极材料抛出蚀除，此过程相当于图 2.2-5b 中的 3～4 段。

(3) 电极材料的抛出

通道和正负极表面放电点瞬时高温使工作液汽化和金属材料熔化、气化，热膨胀产生很高的瞬时压力。通道中心的压力最高，使气化了的气体体积不断向外膨胀，形成一个扩张的“气泡”。气泡上下、内外的瞬时压力并不相符，压力高处的熔融金属流体和蒸气，就被排挤、抛出而进入工作液中，这一过程相当于图 2.2-5a、b 中 3～4 段的后期。

由于表面张力和内聚力的作用，抛出的材料具有最小的表面积，冷凝时凝聚成细小的圆球颗粒（直径约 0.1～300 μm，随脉冲能量而异）。图 2.2-6a～d 为放电过程中四个阶段放电间隙状态的示意图。

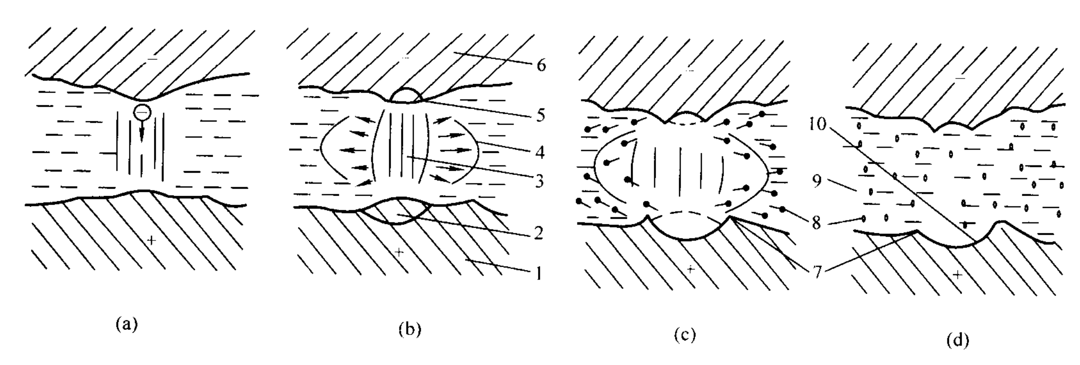


图 2.2-6　放电间隙状况示意图

1—正极；2—从正极上熔化并抛出金属的区域；3—放电通道；4—气泡；5—在负极上熔化并抛出金属的区域；6—负极；7—翻边凸起；8—在工作液中凝固的微粒；9—工作液；10—放电形成的凹坑

实际上熔化和气化了的金属在抛离电极表面时，向四处飞溅，除绝大部分抛入工作液中收缩成小颗粒外，还有一小部分飞溅、镀覆、吸附在对面的电极表面上。这种互相飞溅、镀覆以及吸附的现象，在某些条件下可以用来减少或补偿工具电极在加工过程中的损耗。

半露在空气中进行电火花加工时，可以见到橘红色甚至蓝白色的火花四溅，它们就是被瞬时、局部高压微爆炸抛出的金属高温熔滴和小屑，与砂轮磨削时飞溅出的火花有些类似。

观察铜打钢电火花加工后的电极表面时，可以看到钢上粘有铜、铜上粘有钢的痕迹。如果进一步分析电加工后的产物，在显微镜下可以看到除了游离碳粒、大小不等的铜和钢的球状颗粒之外，还有一些钢包铜、铜包钢、互相飞溅包容的颗粒。此外还有少数由气态金属冷凝成的中心带有空泡的空心球状颗粒产物。

实际上，金属材料的蚀除、抛出过程远比上述讲的复杂。放电过程中工作液不断汽化，正极受电子撞击，负极受正离子撞击，电极材料不断熔化、气化，气泡不断扩大。当放电结束后，气泡温度不再升高，但由于液体介质惯性作用使气泡继续扩展，致使气泡内压力急剧降低，甚至降到大气压以下，形成局部真空，使在高压下溶解在熔化和过热材料中的气体析出，材料本身在低压下也在沸腾。由于压力的骤降，使熔融金属材料及其蒸气从小坑中再次爆沸飞溅而被抛出，超高速摄影的图片证实了这些论断。

熔融材料抛出后，在电极表面形成放电痕，如图 2.2-7 所示。熔化区未被抛出的材料冷凝后残留在电极表面，形成熔化层，在四周形成稍凸起的翻边。熔化层下面是热影响层，再往下才是无变化的材料基体。上述过程，发生在图 2.2-5a、b 中 4～5 段，甚至更后的脉冲间隔时间内。

总之，材料的抛出是热爆炸力、电动力、流体动力等综合作用的结果，对这一复杂的抛出机理的认识还在不断深化中。

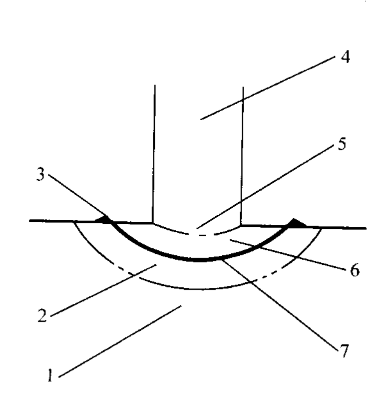


图 2.2-7　放电痕剖面示意图

1—无变化区；2—热影响区；3—翻边凸起；4—放电通道；5—气化区；6—熔化区；7—熔化层

正极、负极受电子、正离子撞击的能量、热量不同，不同电极材料的熔电、汽化点不同，脉冲宽度、脉冲电流的大小不同，正、负电极上被抛出材料的数量也不会相同，目前还无法精确定量计算，但它们对加工速度、电极损耗、表面质量和加工精度等工艺指标却有很大影响，值得进一步研究。

(4) 极间介质的消电离

随着脉冲电压的结束，脉冲电流也迅速降为零，图 2.2-5 中 4～5 段标志着一次脉冲放电结束，但此后仍应有一段间隔时间，使间隙介质消除电离，即放电通道中的正负带电粒子复合为中性粒子（原子），恢复本次放电通道处间隙介质的绝缘强度，以及降低电极表面温度等，以免下次总是重复在同一处电离击穿而导致电弧放电，从而保证在别处按两极相对最近处或电阻率最小处形成下一放电通道。

在加工过程中产生的电蚀产物（如金属微粒、碳粒子、气泡等）如果来不及排除、扩散出去，就会改变间隙介质的成分，并降低绝缘强度。脉冲火花放电时产生的热量不及时

传出，带电粒子的自由能不易降低，将大大减少复合的几率，使消电离过程不充分，结果将使下一个脉冲放电通道始终集中在某一部位，使介质和金属表面局部过热而破坏消电离过程。这样脉冲火花放电将恶性循环，转变为有害的稳定电弧放电。同时工作液局部高温分解后可能结炭，在该处聚成焦粒而在两极间搭桥，使加工无法进行下去，并烧伤电极和工件。

由此可见，为了保证电火花加工过程正常，在两次脉冲放电之间一般要有足够的脉冲间隔时间 t_o。这一脉冲间隔时间的选择，不仅要考虑介质本身消电离所需的时间（与脉冲能量有关，但总的来说，消电离时间较快，只需 5～50 μs），还要考虑电蚀产物排离放电区域的难易程度（与脉冲爆炸力大小、放电间隙小、抬刀及加工面积有关）。此外还应留有余地，使击穿、放电点分散、转移，否则若在一点附近放电，易形成电弧。

到目前为止，人们对于电火花加工微过程的了解还是很不够的，诸如工作液成分作用，间隙介质的击穿，放电间隙内的状况，正负电极间能量的转换与分配，材料的抛出，电火花加工过程中热场、流场、力场的变化，通道结构及其振荡，以及煤油工作液的热分解、裂变，带电碳微粒在正电极上的吸附等胶体化学现象等，都还需要进一步研究。

编写：刘晋春（哈尔滨工业大学）
白基成（哈尔滨工业大学）



第 3 章　电火花加工中的基本规律

电火花加工是基于电能瞬时、局部转换成热能来熔化和气化而蚀除金属的，与金属切削加工靠塑性变形来去除金属的原理和基本规律完全不同。只有了解和掌握电火花加工中的基本工艺规律，才能正确地针对不同工件材料选用合适的工具电极材料；只有合理地选择粗、中、精电加工参数和规准，才能充分发挥脉冲电源和电火花加工机床的作用，多快好省地加工出合格的模具或工件产品。

本章主要就电火花加工时影响放电腐蚀量、工件的加工速度、工具电极的损耗速度，影响电火花加工精度、表面质量的因素进行论述。

1　影响放电蚀除量的主要因素

电火花加工过程中，材料被放电蚀除的规律是十分复杂的综合性问题。研究影响材料放电蚀除量的因素，应用电火花加工方法、提高电火花加工的生产率、降低工具电极的损耗是极为重要的。

1.1　极性效应的影响

在电火花加工过程中，无论是正极还是负极，都会受到不同程度的电蚀。即使是相同材料（例如钢加工钢），正、负电极的电蚀量也不同。这种单纯由于正、负极性不同而彼此电蚀量不一样的现象叫做极性效应。如果两极材料不同，则极性效应更加复杂。在生产中，通常把工件接脉冲电源的正极（工具电极接负极）时，称“正极性”加工；反之，工件接脉冲电源的负极（工具电极接正极）时，称“负极性”加工，又称“反极性”加工。

产生极性效应的原因很复杂，对这--问题的原则性解释是：在火花放电过程中，正、负电极表面分别受到负电子和正离子的轰击和瞬时热源的作用，在两极表面所分配到的能量不一样，因而熔化、气化抛出的电蚀量也不一样。因为电子的质量和惯性均小，容易获得很大加速度和速度，在击穿放电的初始阶段就有大量的电子奔向正极，把能量传递给阳极表面，使电极材料迅速熔化和气化；而正离子则由于质量和惯性较大，起动和加速较慢，在击穿放电的初始阶段，大量的正离子来不及到达负极表面，到达负极表面并传递能量的只有一小部分正离子。所以在用短脉冲加工时，负电子对正极的轰击作用大于正离子对负极的轰击作用，所以正极的蚀除速度大于负极的蚀除速度，这时工件应接正极。当采用长脉冲（即放电持续时间较长）加工时，质量和惯性大的正离子将有足够的时间加速，到达并轰击负极表面的离子数将随放电时间的增长而增多。由于正离子的质量大，对负极表面的轰击破坏作用强，同时自由电子挣脱负极时要从负极获取逸出功，而正离子到达负极后与电子结合释放位能，故长脉宽时负极的蚀除速度将大于正极，这时工件应接负极。因此，当采用窄脉冲（例如纯铜电极加工钢时，$t_i < 10\ \mu s$）精加工时，应选用正极性加工；当采用长脉冲（例如纯铜加工钢时，$t_i > 100\ \mu s$）粗加工时，应采用负极性加工，可以得到较高的蚀除速度和较低的电极损耗。

能量在两极上的分配对两个电极电蚀量的影响是一个极为重要的因素，而电子正离子对电极表面的轰击则是影响能量分布的主要因素，因此，电子轰击和正离子轰击无疑是影响极性效应的重要因素。但是近年来的生产实践和研究结果表明，正的电极表面能吸附、分解游离出来的碳微粒，减小电极损耗。此外，覆盖和镀覆作用对极性效应的影响在某些条件下也不可忽视。例如，纯铜电极加工钢工件，当脉宽为 8 μs 时，通常的脉冲电源必须采用正极性加工，但在用分组脉冲进行加工时，虽然脉宽也为 8 μs，却需采用负极性加工，因为这时在正极纯铜表面明显地存在着吸附的炭黑膜，保护了正极，因而使钢工件负极的蚀除速度大大超过了正极。在普通脉冲电源上的实验也证实了炭黑膜对极性效应的影响。当脉宽为 12 μs、脉间为 15 μs 时，往往正极蚀除速度大于负极，应采用正极性加工。当脉宽不变，逐步把脉间减少（应配之以抬刀，以防止拉弧），以利于炭黑膜在正极上的形成，使负极蚀除速度大于正极而必须改用负极性加工。实际上是极性效应和正极吸附炭黑之后对正极的保护作用的综合效果。

由此可见，极性效应是一个较为复杂的问题。它除了受脉宽、脉间的影响外，还要受到正极吸附炭黑保护膜和脉冲峰值电流、放电电压、工作液以及电极对的材料等的影响。

从提高加工生产率和减少工具损耗的角度来看，极性效应愈显著愈好，故在电火花加工过程中必须充分利用极性效应。当用交变的脉冲电流加工时，单个脉冲的极性效应便相互抵消，增加了工具的损耗。因此，电火花加工一般都采用单向脉冲电源。

除了充分地利用极性效应、正确地选用极性、最大限度地降低工具电极的损耗外，还应合理选用工具电极的材料，根据电极对材料的物理性能和加工要求选用最佳的电参数，使工件的蚀除速度最大，工具损耗尽可能小。

1.2　电参数对电蚀量的影响

研究结果表明，在连续的电火花加工过程中，无论正极或负极，都存在单个脉冲的蚀除量 q' 与单个脉冲能量 W_M 在一定范围内成正比的关系。某一段时间内的总蚀除量 q 约等于这段时间内各单个有效脉冲除量的总和，故正、负极的蚀除速度与单个脉冲能量、脉冲频率成正比。用公式表示为

$$\left.\begin{aligned} q_a &= K_a W_M f\varphi t \\ q_c &= K_c W_M f\varphi t \end{aligned}\right\} \tag{2.3-1}$$

$$\left.\begin{aligned} v_a &= \frac{q_a}{t} = K_a W_M f\varphi t \\ v_c &= \frac{q_c}{t} = K_c W_M f\varphi t \end{aligned}\right\} \tag{2.3-2}$$

式中，q_a、q_c 为正极、负极的总蚀除量；v_a、v_c 为正极、负极的蚀除速度，亦即工件生产率或工具损耗速度；W_M 为单个脉冲能量；f 为脉冲频率；t 为加工时间；K_a、K_c 为与电极材料、脉冲参数、工作液等有关的工艺系数；φ 为有效脉冲利用率。

以上符号中，角标 a 表示正极，c 表示负极。

单个脉冲放电所释放的能量取决于极间放电电压、放电电流和放电持续时间，所以单个脉冲放电能量为

$$W_M = \int_0^{t_e} u(t)\, i(t)\, \mathrm{d}t \tag{2.3-3}$$

式中，t_e 为单个脉冲实际放电时间，s；$u(t)$为放电间隙中随时间而变化的电压，V；$i(t)$为放电间隙中随时间而变化的电流，A；W_M 为单个脉冲放电能量，J。

由于火花放电间隙电阻的非线性特性，击穿后间隙上的火花维持电压是一个与电极对材料及工作液种类有关的数值（如在煤油中用纯铜加工钢时约为 25 V，用石墨加工钢时约为 25 ~ 30 V；而在乳化液中用钼丝加工钢时则为 18 ~ 20 V）。



火花维持电压与脉冲电压幅值、极间距离以及放电电流大小等的关系不大，因而可以说，正负极的电蚀量正比于平均放电电流的大小和电流脉宽；对于矩形波脉冲电流，实际上正比于放电电流的幅值。在通常的晶体管脉冲电源中，脉冲电流近似地为一矩形波，故当纯铜电极加工钢时的单个脉冲能量为

$$W_M = (20 \sim 25)\ \hat{i}_e t_e \quad (2.3\text{-}4)$$

式中，$\hat{i}_e$ 为脉冲电流幅值，A；t_e 为电流脉宽，μs。

由此可提高电蚀量和生产率的途径在于：提高脉冲频率 f；增加单个脉冲能量 W_M，或者增加单个脉冲平均放电电流 i_e（对矩形脉冲即为峰值电流 $\hat{i}_e$）和脉冲宽度 t_i；减小脉冲间隔 t_o；设法提高系数 K_a、K_c。当然，实际生产时要考虑到这些因素之间的相互制约关系和对其他工艺指标的影响，例如，脉冲间隔时间过短，将产生电弧放电；随着单个脉冲能量的增加，加工表面粗糙度值也随之增大等。

1.3 金属材料热学物理常数对电蚀量的影响

所谓热学常数是指熔点、沸点（气化点）、热导率、比热容、熔化热、气化热等。表 2.3-1 所列为几种常用材料的热学物理常数。

表 2.3-1 常用材料的热学物理常数

热学物理常数	材料				
	铜	石墨	钢	钨	铝
熔点 T_r/℃	1 083	3 727	1 535	3 410	657
比热容 c/J·(kg·K)$^{-1}$	393.56	1674.7	695.0	154.91	900
熔化热 q_r/J·kg^{-1}	179 258.4	—	209 340	159 340	385 185.6
沸点 T_f/℃	2 595	4 830	3 000	5 930	2 450
气化热 q_q/J·kg^{-1}	5 304 256.9	46 054 800	6 290 667	—	10 894 953.6
热导率 λ/J·(cm·s·K)$^{-1}$	3.998	0.800	0.816	1.700	2.378
热扩散率 a/cm^2·s^{-1}	1.179	0.217	0.150	0.568	0.920
密度 ρ/g·cm^{-3}	8.9	2.2	7.9	19.3	2.54

注：1. 热导率为 0℃时的值。
2. 热扩散率 $a = \lambda / c\rho$。

每次脉冲放电时，通道内及正、负电极放电点都瞬时获得大量热能。而正、负电极放电点所获得的热能，除一部分由于热传导散失到电极其他部分和工作液中外，其余部分将依次消耗在：①使局部金属材料温度升高直至达到熔点，而每千克金属材料升高 1℃（或 1 K）所需之热量即为该金属材料的比热容；②每熔化 1 g 材料所需之热量即为该金属的熔化热；③使熔化的金属液体继续升温至沸点，每千克材料升高 1℃所需之热量即为该熔融金属的比热容；④使熔融金属气化，每气化 1 g 材料所需的热量称为该金属的气化热；⑤使金属蒸气继续加热成过热蒸气，每千克金属蒸气升高 1℃所需的热量为该蒸气的比热容。

显然当脉冲放电能量相同时，金属的熔点、沸点、比热容、熔化热、气化热愈高，则电蚀量愈小，其加工的难度就愈大；另一方面，热导率愈大的金属，由于较多地把瞬时产生的热量传导散失到其他部分，因而降低了本身的蚀除量，也不易加工。各种金属材料电火花加工的难易程度依次为：钨、铜、银、钼、铝、钽、铂、铁、镍、不锈钢、钛，而且当单个脉冲能量一定时，脉冲电流幅值 $\hat{i}_e$ 愈小，即脉冲宽度 t_i 愈长，散失的热量也愈多，从而影响电蚀量的减少；相反，若脉冲宽度 t_i 愈短，脉冲电流幅值 $\hat{i}_e$ 愈大，由于热量过于集中而来不及传导扩散，虽使散失的热量减少，但抛出的金属中汽化部分比例增大，多耗用不少气化热，电蚀量也会降低。因此，电极的蚀除量与电极材料的热导率以及其他热学常数、放电持续时间、单个脉冲能量有密切关系。

由此可见，当脉冲能量一定时，都各有一个使工件电蚀量最大的最佳脉宽。由于各种金属材料的热学常数不同，故获得最大电蚀量的最佳脉宽还与脉冲电流幅值有相互匹配的关系，它将随脉冲电流幅值 $\hat{i}_e$ 的不同而变化。

图 2.3-1 示意地描绘了在相同放电电流情况下，铜和钢两种材料的电蚀量与脉宽的关系。从图中可以看出，当采用不同的工具、工件材料，选择脉冲宽度在 t'_e 附近时，正确地选择极性，既可以获得较高的生产率，又可以获得较低的工具损耗，有利于实现“高效低损耗”的加工。

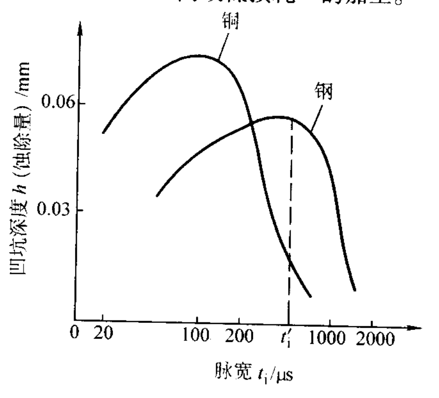


图 2.3-1 不同材料加工时电蚀量与脉宽的关系

1.4 工作液对电蚀量的影响

在电火花加工过程中，工作液的作用是：形成火花击穿放电通道，并在放电结束后迅速恢复间隙的绝缘状态；对放电通道产生压缩作用；帮助电蚀产物的抛出和排除；对工具、工件的冷却作用。因而它对电蚀量也有较大的影响。介电性能好、密度和黏度大的工作液有利于压缩放电通道，提高放电的能量密度，强化电蚀产物的抛出效果；但黏度大，不利于电蚀产物的排出，影响正常放电。目前电火花成形加工主要采用油类作为工作液，粗加工时采用的脉冲能量大、加工间隙也较大、爆炸排屑抛出能力强，往往选用介电性能、黏度较大的机油，且机油的燃点较高，大能量加工时着火燃烧的可能性小；而在中、精加工时放电间隙比较小，排屑比较困难，故一般均选用黏度小、流动性好、渗透性好的煤油作为工作液。



由于油类工作液有味、容易燃烧，尤其在大能量粗加工时工作液高温分解产生的烟气很大，故寻找一种像水那样的流动性好、不产生碳黑、不燃烧、无色无味、价廉的工作液介质一直是人们努力的目标。水的绝缘性能和粘度较低，在同样加工条件下，和煤油相比，水的放电间隙较大、对通道的压缩作用差、蚀除量较少、且易锈蚀机床，但经过采用各种添加剂，可以改善其性能。最新的研究成果表明，水基工作液加工时的加工速度可大大高于煤油，甚至接近切削加工，但在大面积精加工中较煤油还有一段距离。

1.5 影响电蚀量的一些其他因素

影响电蚀量的还有其他一些因素。首先是加工过程的稳定性，加工过程不稳定将干扰以致破坏正常的火花放电，使有效脉冲利用率降低。随着加工深度、加工面积的增加或加工型面复杂程度的增加，都不利于电蚀产物的排出，影响加工稳定性，降低加工速度，严重时将使结炭拉弧，使加工难以进行。为了改善排屑条件，提高加工速度和防止拉弧，常采用强迫冲油和工具电极定时抬刀等措施。

如果加工面积较小，而采用的加工电流较大，也会使局部电蚀产浓度过高，放电点不能分散转移，放电后的余热来不及传播扩散而积累起来，造成过热，形成电弧，破坏加工的稳定性，参见表2.3-1。

电极材料对加工稳定性也有影响，钢电极加工钢时电极间隙容易磁化，吸附铁屑，加工不易稳定，纯铜、黄铜加工钢时则比较稳定。脉冲电源的波形及其前后沿陡度影响着输入能量的集中或分散程度，对电蚀量也有很大影响。

电火花加工过程中电极材料瞬时熔化或气化而抛出，如果抛出速度很高，就会冲击另一电极表面而使其蚀除量增大；如果抛出速度较低，则当喷射到另一电极表面时，会反粘和涂覆在电极表面，减少其蚀除量。此外，炭黑膜的形成也将影响到电极的蚀除量。如果工作液是以水溶液为基础的，如去离子水、乳化液等，还会产生电化学阳极溶角和阴极电镀沉积现象，影响电极的蚀除量。

2 电火花加工的加工速度和工具电极的损耗速度

电火花加工时，工具和工件同时遭到不同程度的电蚀，单位时间内工件的电蚀量称为加工速度，亦即生产率；单位时间内工具的电蚀量称为损耗速度。它们是一个问题的两个方面。

2.1 加工速度

一般常用体积加工速度 v_W 来表示，即用被加工掉的体积 V 除以加工时间 t 来表示

$$v_W = V/t \tag{2.3-5}$$

有时为了测量方便，也用质量加工速度 v_m 来表示，单位为 g/min。

根据前面对电蚀量的讨论，提高加工速度的途径在于：提高脉冲频率 f；增加单个脉冲能量 W_M；设法提高工艺系数 K。同时还应考虑这些因素间的相互制约关系和对其他工艺指标的影响。

提高脉冲频率可缩小脉冲停歇时间，但脉冲停歇时间过短，会使加工区工作液来不及消电离、排除电蚀产物及气泡来恢复其介电性能，以致形成破坏性的稳定电弧放电，使电火花加工过程不能正常进行。

增加单个脉冲能量主要靠加大脉冲电流和增加脉冲宽度。单个脉冲能量的增加可以提高加工速度，但同时会增大表面粗糙度和降低加工精度，因此一般只用于粗加工和半精加工的场合。

提高工艺系数 K 的途径很多，如合理选用电极材料、电参数和工作液，改善工作液的循环过滤方式等，从而提高有效脉冲利用率 φ，达到提高工艺系数 K 的目的。

电火花成形加工速度分别为：粗加工（加工表面粗糙度 R_a 为 10～20 μm）时可达 200～300 mm³/min，半精加工（R_a 为 2.5～10 μm）时降低到 20～100 mm³/min，精加工（R_a 为 0.32～2.5 μm）时一般都在 10 mm³/min 以下。随着表面粗糙度值的减小，加工速度显著下降。加工速度与加工电流 i_e 有关，对电火花成形加工，每安培加工电流的速度约为 10 mm³/min。

2.2 工具电极相对损耗速度和相对损耗比

在生产实际中用来衡量工具电极是否损耗，不只是看工具损耗速度 v_E，还要看同时能达到的加工速度 v_W。因此，采用相对损耗或称损耗比 θ 作为衡量工具电极损耗的指标，即

$$\theta = \frac{v_e}{v_W} \times 100\% \tag{2.3-6}$$

上式中的加工速度和损耗速度均以 mm³/min 为单位计算，则 θ 为体积相对损耗；如以 g/min 为单位计算，则 θ 为质量相对损耗。

为了降低工具电极的相对损耗，必须很好地利用电火花加工过程中的各种效应。这些效应主要包括：极性效应、吸附效应、传热效应等，这些效应又是相互影、综合作用的。

1）正确选择极性　一般来说，在短脉冲精加工时采用正极性加工（即工件接电源正极），而在长脉冲粗加工时则采用负极性加工。人们曾对不同脉冲宽度和加工极性的关系做过许多实验，得出了如图2.3-2所示的试验曲线。试验用的工具电极为 ϕ6 mm 的纯铜，加工工件为钢，工作液为煤油，矩形波脉冲电源，加工电流峰值为 10 A。由图可见，负极性加工时，纯铜电极的相对损耗随脉冲宽度的增加而减少，当脉冲宽度大于120 μs后，电极相对损耗将小于 1%，可以实现低损耗加工（相对损耗小于 1%的加工）。如果采用正极性加工，不论采用哪一挡脉冲宽度，电极的相对损耗都难以低于 10%。然而在脉宽小于 15 μs 的窄脉宽范围内，正极性加工的工具电极相对损耗比负极性加工的小。

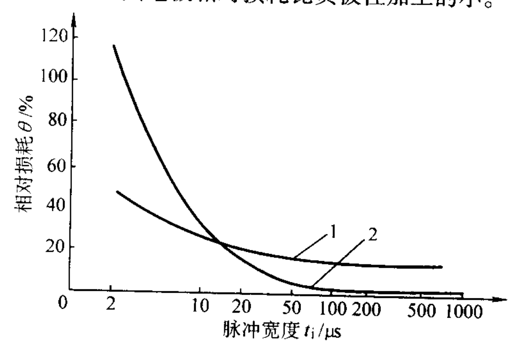


图 2.3-2 电极相对损耗与极性、脉宽的关系
1—正极性加工；2—负极性加工

2）利用吸附效应　在用煤油之类的碳氢化合物作工作液时，在放电过程中将发生热分解，而产生大量的游离碳微粒，还能和金属结合形成金属碳化物的微粒，即胶团。中性的胶团在电场作用下可能与其可动层（胶团的外层）脱离，而成为带电荷的碳胶粒。电火花加工中的碳胶粒一般带负电荷，因此，在电场作用下会逐步向正极移动，并吸附在正极表面。如果电极表面瞬时温度在 400℃左右，且能保持一定时间，即能形成一定强度和厚度的化学吸附碳层，通常称为炭黑膜。由于碳的熔点和气化点很高，可对电极起到保护和

补偿作用，从而实现“低损耗”加工。

由于炭黑膜只能在正极表面形成，因此，要利用炭黑膜的补偿作用来实现电极的低损耗，必须采用负极性加工。为了保持合适的温度场和吸附炭黑的时间，增加脉冲宽度是有利的。实验表明，当峰值电流、脉冲间隔一定时，炭黑膜厚度随脉宽的增加而增厚；而当脉冲宽度和峰值电流一定时，炭黑膜厚度随脉冲间隔的增大而减薄。这是由于脉冲间隔加大，正极吸附炭黑的时间缩短；引起放电间隙中介质消电离作用增加，胶粒扩散，放电通道分散；电极表面温度降低，都使“吸附效应”减少。反之，随着脉冲间隔的减少，电极损耗随之降低。但过小的脉冲间隔将使放电间隙来不及消电离和使电蚀产物扩散，因而造成电弧烧伤。

影响“吸附效应”的除上述电参数外，还有冲、抽油的影响。采用强迫冲、抽油，有利于间隙内电蚀产物的排除，使加工稳定；但强迫冲、抽油使吸附、镀覆效应减弱，因而增加了电极的损耗。所以，在加工过程中采用冲、抽油时，要注意控制其冲、抽油的压力，使其不要过大。

3）利用传热效应　对电极表面温度场分布的研究表明，电极表面放电点的瞬间温度不仅与瞬间放电的总热量（与放电能量成正比）有关，而且与放电通道的截面积有关，与电极材料的导热性能有关。因此，在放电初期限制脉冲电流的增长率（$\mathrm{d}i/\mathrm{d}t$）对降低电极损耗是有利的，可使电流密度不至于太高，也就使电极表面温度不至于过高而遭受较大的损耗。脉冲电流增长率太高时，对在热冲击波作用下易脆裂的工具电极（如石墨）的损耗，影响尤为显著。另外，由于一般采用的工具电极的导热性能比工件好，如果采用较大的脉冲宽度和较小的脉冲电流进行加工，导热作用使电极表面上较低而减少损耗，工件表面上仍较高而遭到蚀除。

4）选用合适的材料　钨、钼的熔点和沸点较高，损耗小，但其机械加工性能不好，价格不贵，所以除线切割用钨钼丝外，其他很少采用。铜的熔点虽较低，但其导热性好，因此损耗也较少，又能制成各种精密、复杂的电极，常作为中、小型腔加工的工具电极。石墨电极不仅热学性能好，而且在长脉冲粗加工时能吸附游离的碳来补偿电极的损耗，所以相对损耗很低，目前已广泛用作型腔加工的电极。铜碳、铜钨、银钨合金等复合材料，不仅导热性好，而且熔点高，因而电极损耗小，但由于其价格较贵，制造成形比较困难，因而一般只在精密电火花加工时采用。

上述诸因素对电极损耗的影响是综合作用的，根据实际生产经验，在煤油中采用负极性粗加工时，脉冲电流幅值应较小，它与放电脉冲宽度的比值（$\hat{i}_e/t_e$）满足如下条件时，可以获得低损耗加工：

石墨加工钢：$\hat{i}_e/t_e \leqslant 0.1 \sim 0.2$ A/μs；

铜加工钢：$\hat{i}_e/t_e \leqslant 0.06 \sim 0.012$ A/μs；

钢墨加工钢：$\hat{i}_e/t_e \leqslant 0.04 \sim 0.08$ A/μs。

以上低损耗条件的经验公式并不完善，其中没有包含脉冲间隔对电极损耗的影响，但在生产中仍有很大的参考价值。在实际应用中，由于有的脉冲电源没有等脉冲功能，因此常以电压脉宽 t_i 代替 t_e，以便于参数的设定。具体可参考第4章图2.4-1～图2.4-16等。

3　影响电火花加工精度的主要因素

与通常的机械加工一样，机床本身的各种误差以及工件和工具电极的定位、安装误差都会影响到加工精度，这里主要讨论与电火花加工工艺有关的因素。

影响电火花加工精度的主要因素有：放电间隙的大小及其一致性；工具电极的损耗及其稳定性。电火花加工时，工具电极与工件之间存在着一定的放电间隙，如果加工过程中放电间隙保持不变，则可以通过修正工具电极的尺寸对放电间隙进行补偿，以获得较高的加工精度。然而，放电间隙的大小实际上是变化的，影响着加工精度。

放电间隙可用下列经验公式来表示

$$S = K_u \hat{u}_i + K_R W_M^{0.4} + S_m \qquad (2.3\text{-}7)$$

式中，S 为放电间隙（指单面放电间隙），μm；$\hat{u}_i$ 为开路电压，V；K_u 为与工作液介电强度有关的常数，纯煤油时为 5×10^{-2}，含有电蚀产物后 K_u 增大；K_R 为与加工材料有关的常数，一般易熔金属的值较大，对铁，$K_R = 2.5/10^2$，对硬质合金，$K_R = 1.4\times10^2$，对铜，$K_R = 2.3\times10^2$；W_M 为单个脉冲能量，J；S_m 为考虑热膨胀、收缩、振动等影响的机械间隙，约3 μm。

除了间隙能否保持一致性外，间隙大小对加工精度（特别是仿形精度）也有影响，尤其是对复杂形状的加工表面，棱角部位电场强度分布不均，间隙越大，影响越严重。因此，为了减少加工误差，应该采用较弱小的加工规准，缩小放电间隙，这样不但能提高仿形精度，而且放电间隙愈小，可能产生的间隙变化量也愈小；另外，还必须尽可能使加工过程稳定。电参数对放电间隙的影响是非常显著的，精加工的放电间隙一般只有0.01 mm（单面），而在粗加工时则为0.5 mm左右。

工具电极的损耗对尺寸精度和形状精度都有影响。电火花穿孔加工时，电极可以贯穿型孔而补偿电极的损耗，型腔加工时则无法采用这一方法，精密型腔加工时可采用更换电极的方法。

影响电火花加工形状精度的因素还有“二次放电”。二次放电是指已加工表面上由于电蚀产物等的介入而再次进行的非必要的放电，它使加工深度方向产生斜度和加工棱角棱边变钝。

产生加工斜度的情况如图2.3-3所示。由于工具电极下端部加工时间长，绝对损耗大，而电极入口处的放电间隙则由于电蚀产物的存在，“二次放电”的机率大，而使放电间隙扩大，因而产生了加工斜率，俗称喇叭口。

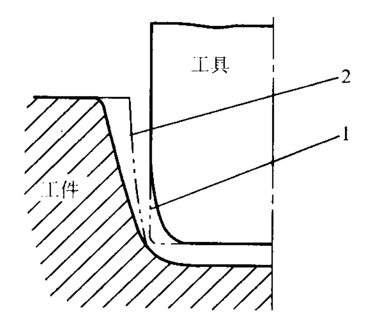


图2.3-3　电火花加工时的加工斜率

1—电极无损耗时的工具轮廓线；

2—电极有损耗而不考虑二次放电时的工件轮廓线

电火花加工时，工具的尖角或凹角很难精确地复制在工件上，这是因为当工具为凹角时，工件上对应的尖角处放电蚀除的概率大，容易遭受腐蚀而成为圆角，如图2.3-4a所示。当工具为尖角时，一则由于放电间隙的等距性，工件上只能加工出以尖角顶点为圆心、放电间隙 S 为半径的圆弧；二则工具上的尖角本身因尖端放电蚀除的概率大而损耗成圆角，如图2.3-4b所示。采用高频窄脉宽精加工，放电间隙小，圆角半径可以明显减少，因而提高了仿形精度，可以获得圆角半径小于0.01 mm的尖棱，这对于加工精密小模数齿轮等冲模是很重要的。

目前，电火花加工的精度可达0.01～0.05 mm，在精密光整加工时可小于0.005 mm。

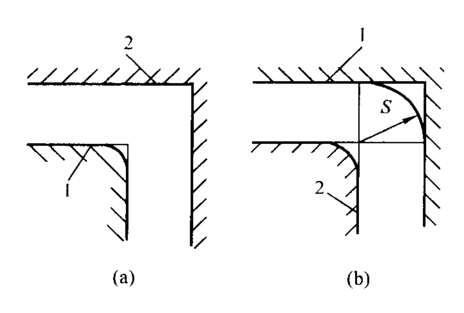


图 2.3-4　电火花加工时尖角变圆
1—工件；2—工具

4　电火花加工的表面质量

电火花加工的表面质量主要包括表面粗糙度、表面变质层和表面机械性能三部分。

4.1　表面粗糙度

电火花加工表面和机械加工的表面不同，它是由无方向性的无数小坑和硬凸边所组成，特别有利于保存润滑油；而机械加工表面则存在着切削或磨削刀痕，具有方向性。两者相比，在相同的表面粗糙度和有润滑油的情况下，电火花加工表面的润滑性能和耐磨损性能均比机械加工的表面好。

与切削加工一样，电火花加工表面粗糙度通常用微观轮廓平面度的平均算术偏差 R_a 表示，也有用微观轮廓不平度平均高度值 R_x 或用微观轮廓平面度的最大高度值 R_{max} 表示的。对表面粗糙度影响最大的是单个脉冲能量，因为脉冲能量大，每次脉冲放电的蚀除量也大，放电凹坑既大又深，从而使表面粗糙度恶化。表面粗糙度和脉冲能量之间的关系，可用如下实验公式来表示

$$R_{max} = K_R t_e^{0.3} \hat{i}_e^{0.4} \qquad (2.3\text{-}8)$$

式中，R_{max} 为实测的表面粗糙度，μm；K_R 为常数，铜加工钢时常取 2.3；t_e 为单个脉冲放电时间，μs；$\hat{i}_e$ 为脉冲峰值电流，A。

在采用表面粗糙度新国标以前的 20 世纪 80 年代，我国曾采用▽1～▽14级的光洁度等级，现采用国际通用的表面粗糙度 R_a、R_z、R_{max}。表 2.3-2 为表面光洁度与平均算术偏差 R_a、平均高度偏差 R_z 和最大高度偏差 R_{max} 的对照表。

电火花穿孔、型腔加工的表面粗糙度可以分为底面粗糙度和侧面粗糙度，同一规准加工出来的侧面粗糙度因为有二次放电的修光作用，往往要稍好于底面的粗糙度。要获得更好的侧壁表面粗糙度，可以采用平动头或数控摇动工艺来修光。

电火花加工的表面粗糙度和加工速度之间存在着很大的矛盾，例如当表面粗糙度 R_a 由 2.5 μm 提高到 1.25 μm 时，加工速度要下降 10 多倍。按目前的工艺水平，较大面积的电火花成形加工要达到优于 R_a 为 0.32 μm 是比较困难的，但是采用平动或摇动加工工艺可以大为改善。目前，电火花穿孔加工侧面的最佳表面粗糙度 R_a 为 1.25～0.32 μm，电火花成形加工加平动或摇动后最佳表面粗糙度 R_a 为 0.63～0.04 μm，而类似电火花磨削的加工方法，其表面粗糙度 R_a 可小于 0.045～0.02 μm，但这时加工速度很低。因此，一般电火花加工到 R_a 为 2.5～0.63 μm 之后，再采用其他研磨或抛光方法，有利于改善其表面粗糙度并节省工时。

工件材料对加工表面粗糙度也有影响，熔点高的材料（如硬质合金），单脉冲形成的凹坑较小，在相同能量下加工的表面粗糙度要比熔点低的材料（如钢）好。当然，加工速度会相应下降。

精加工时，工具电极的表面粗糙度也将影响到加工粗糙度。由于石墨电极很难加工出非常光滑的表面，因此与纯铜电极相比，用石墨电极加工的表面粗糙度较差。

从式（2.3-8）可见，影响表面粗糙度的因素主要是脉宽 t_e 与峰值电流 $\hat{i}$ 的乘积，亦即单个脉冲能量的大小。但实践中发现，即使单脉冲能量很小，但在电极面积较大时，R_{max} 很难低于 2 μm（R_a 约为 0.32 μm），而且加工面积愈大，可达到的最佳表面粗糙度愈差。这是因为在煤油工作中的工具和工件相当于电容器的两个极，具有“潜布电容”（寄生电容），相当于在放电间隙上并联了一个电容器，当小能量的单个脉冲到达工具和工件时，电能被此电容“吸收”，只能起“充电”作用而不会引起火花放电。只有当多个脉冲充电到较高的电压，积累了较多的电能后，才能引起击穿放电，打出较大的放电凹坑。这种由于潜布电容加工较大面积使表面粗糙度恶化的现象，有时称作“电容效应”。

表 2.3-2　表面光洁度等级与表面粗糙度值对照

光洁度等级	平均算术偏差 R_a/μm	平均高度偏差 R_z/μm	最大高度偏差 R_{max}/μm
▽1	>40～80	>160～320	>320～640
▽2	>20～40	>80～160	>160～320
▽3	>10～20	>40～80	>80～160
▽4	>5～10	>20～40	>40～80
▽5	>2.5～5	>10～20	>20～40
▽6	>1.25～2.5	>6.3～10	>10～20
▽7	>0.63～1.25	>3.2～6.3	>5～10
▽8	>0.32～0.63	>1.6～3.2	>2～5
▽9	>0.16～0.32	>0.8～1.6	>1～2
▽10	>0.08～0.16	>0.4～0.8	>0.5～1
▽11	>0.04～0.08	>0.2～0.4	>0.3～0.5
▽12	>0.02～0.04	>0.1～0.2	>0.1～0.3
▽13	>0.01～0.02	>0.05～0.1	>0.05～0.1
▽14	≤0.01	≤0.05	≤0.05

注：$R_{max} \approx (5 \sim 8)\ R_a$。

近年来国内外出现了“混粉加工”新工艺，可以较大面积地加工出 R_a 为 0.05～0.1 μm 的光亮面。其办法是在煤油工作液中混入硅或铝等导电微粉，使工作液的电阻率降低，放电间隙成倍扩大，潜布电容成倍减少；同时每次从工具到工件表面的放电通道，被微颗粒分割形成多个小的火花放电通道，到达工件表面的脉冲能量“分散”得很小，相应的放电痕也就较小，可以稳定获得大面积的光整表面，详见第 8 章第 1 节。

4.2　表面变质层

电火花加工过程中，在煤油、火花放电局部的瞬时高温高压下从煤油中分解出的碳微粒渗入工件表层，又在工作液的快速冷却作用下，材料的表面层发生了很大的变化。粗略地可把它分为熔化凝固层和热影响层，如图 2.3-5 和图 2.3-6 所示。

1）熔化凝固层　位于工件表面最上层，它被放电时瞬时高温熔化后大部分抛出，小部分滞留下来，受工作液快速

冷却而凝固。对于碳钢来说，熔化层在金相照片上呈现白色，故又称之为白层。它与基体金属完全不同，是一种树枝状的淬火铸造组织，与内层的结合也不甚牢固。它由马氏体和大量晶粒及极细的残余奥氏体及某些未熔化的碳化物组成，用显微威氏硬度计测得其硬度在 1 000 乃至 1 000 以上。

熔化层的厚度随脉冲能量的增大而变厚，大约为 1～2 倍的 R_{max} 值，但一般不超过 0.1 mm。单个脉冲能量一定时，脉宽愈窄，熔化凝固层愈薄，因为大部分金属不是熔化而是在气化状态下被抛出蚀除，不再残留在工件表面。

2）热影响层　介于熔化层和基体之间。热影响层的金属材料并没有熔化，只是受到高温的影响，使材料的金相组织发生了变化，它和基体材料之间并没有明显的界限。由于温度场分布和冷却速度的不同，对淬火钢，热影响层包括再淬火区、高温回火区和低温加火区；对未淬火钢，热影响层主要为淬火区。因此，淬火钢的热影响层厚度比未淬火钢大。

热影响层中靠近熔化凝固层的部分，由于受到高温作用并迅速冷却，形成粹火区，其厚度与条件有关，一般为 2～3 倍的最大微观平面度 R_{max} 值。对淬火钢，与淬火层相邻的部分受到温度的影响而形成高温、低温回火区，回火区的厚度约为最大微观平面度 R_{max} 的 3～4 倍。脉冲宽度愈宽，向内传的就愈多，热影响层也愈厚。

不同金属材料的热影响层其金相组织结构是不同的，耐热合金的热影响层与基体差异不大。

3）显微裂纹　电火花加工表面由于受到瞬时高温作用并迅速冷却而产生拉应力，往往在表面出现显微裂纹。实验表明，一般裂纹仅在熔化层（白层）内出现，只有在脉冲能量很大情况下（粗加工时）才有可能扩展到热影响层。

脉冲能量对显微裂纹的影响是非常明显的。能量愈大，显微裂纹愈宽、愈深。脉冲能量很小时（例如加工表面粗糙度 R_a 优于 1.25 μm 时），一般不出现微裂纹。不同工件材料对裂纹的敏感性也不同，硬质合金解理脆材料容易产生表面显微裂纹。在含铬、钨、钼、钒等合金元素的冷轧模具钢、热轧模具钢、高速钢、耐热钢中较易产生，在低碳钢和低合金钢中不产生。工件预先的热处理状态对裂纹产生的影响也很明显，加工淬火材料要比加工淬火后回火或退火的材料容易产生裂纹，因为淬火材料脆硬，原始内应力也较大。

图 2.3-5 为硬质合金裂纹发生的区域。在晶体管电源中，脉冲宽度 t_e 在 10 μs 以下是安全区，即使峰值电流较大（< 100 A），也不会产生显微裂纹。

在 RC 线路电容器放电的场合，电容量在 0.5 μF 以下是安全的，但也与电压有关，电压不能超过 100 V，因为单个脉冲能量与电压成平方关系。

放电能量如果很大，甚至在单次放电痕上也有产生微裂纹的可能性。

模具钢的安全区域远比硬质合金大，但即使在有裂纹的加工中，用精加工亦可去掉粗加工后的表面裂纹。

当出现较大的变质层时，从表面开始的硬度变化及放大照片见图 2.3-6。

此例是极粗糙的加工表面的情况，表面粗糙度 R_{max} 为 250 μm，从表面开始受影响的厚度为加工表面粗糙度 R_{max} 值的近 2 倍。

加工表面一旦熔化就存在再凝固层，因此，在表面存在着残余拉应力（约 70～80 Pa）。这种残余拉应力使抗疲劳强度减弱（压应力反而使抗疲劳强度变强），所以粗加工后应尽可能精加工，以去除熔化再凝固层，这对模具的寿命是有益的。

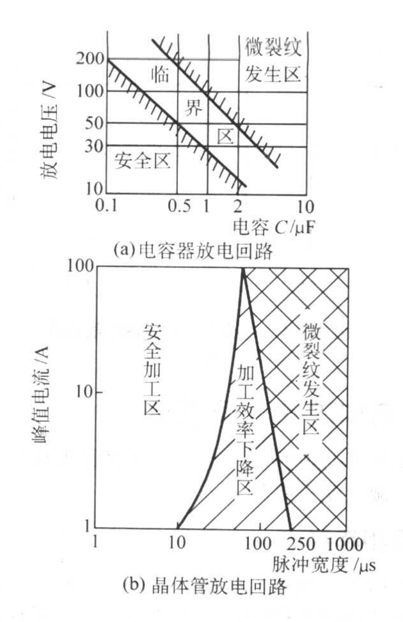


图 2.3-5　硬质合金微裂纹发生区域

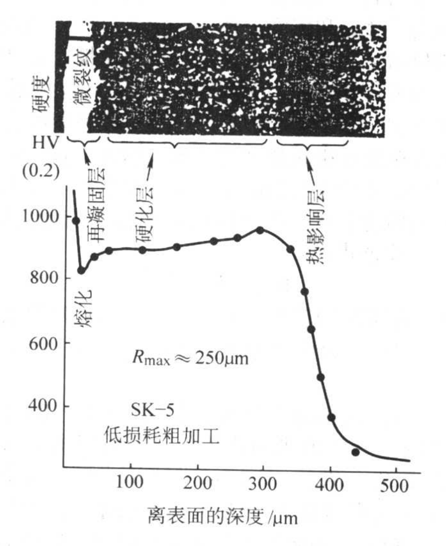


图 2.3-6　电火花加工变质层断面状况

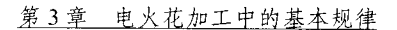
4.3　表面机械性能

1）显微硬度及耐磨性　电火花加工后表面层的硬度一般均比较高，但对某些淬火钢，也可能稍低于基体硬度。对未淬火钢，特别是原来含碳量低的钢，热影响层的硬度都比基体材料高；对淬火钢，热影响层中的再淬火区硬度稍高或接近于基体硬度，而回火区的硬度比基体低，高温回火区又比低温回火区的硬度低。因此，一般来说，电火花加工表面最外层的硬度比较高，耐磨性好。但对于滚动摩擦，由于是交变载荷，特别是干摩擦，则因熔化凝固层和基体的结合不牢固，容易剥落而加快磨损。因此，有些要求高的模具需把电火花加工后的表面变质层事先研磨掉。

2）残余应力　电火花加工表面存在着由于瞬时先热胀后冷缩作用而形成的残余应力，而且大部分表现为拉应力。残余应力的大小和分布，主要和材料在加工前的热处理状态及加工时的脉冲能量有关。因此，对表面层要求质量较高的工件，应尽量避免使用较大的电加工规准。

3）耐疲劳性能　电火花加工表面存在着较大的拉应力，还可能存在显微裂纹，因此其耐疲劳性能比机械加工的表面







低许多倍。采用回火处理、喷丸处理等，有助于降低残余应力，或使残余拉应力转变为压应力，从而提高其耐疲劳性能。

试验表明，当表面粗糙度 R_a 在 0.32～0.08 μm 时，电火花加工表面的耐疲劳性能将与机械加工表面相近。这是因为电火花精微加工表面所使用的加工规准很小，熔化凝固层和热影响层均非常薄，不会出现显微裂纹，而且表面的残余拉应力也较小。

编写：刘晋春（哈尔滨工业大学）
白基成（哈尔滨工业大学）
刘　华（哈尔滨工业大学）

第 4 章　电火花加工工艺参数及其曲线图表

1　电火花加工的工艺参数

电火花加工的工艺参数可分为电参数和非电参数。电参数主要是脉冲电源的参数，有加工极性（工件接正极还是负极）、脉宽、脉间、峰值电压、峰值电流等。非电参数主要有冲油或抽油的方式、压力、流量，抬刀高度、频率，平动方式和平动量的大小等，它们相互影响，给参数的选择增加了难度。本章主要讲述电参数的选择。

为了能正确选择电火花加工参数规准，使其有章可循，人们根据工具电极、工件的材料、加工极性、脉宽、峰值电流等主要参数对表面粗糙度、放电间隙、蚀除速度和电极损耗率等四个主要工艺指标的影响，事先做成工艺曲线图表，按此来选择电火花加工的规准。

本书提供 16 张电加工工艺参数曲线图表（图 2.4-1 ~ 图 2.4-16），它们都是在具体的电火花机床、晶体管矩形波脉冲电源（开路电压为 80 V）、伺服进给系统、煤油工作液等条件下，通过大量、系统的工艺试验作出的工艺曲线图表。各种电火花机床、脉冲电源、伺服进给系统等基本上都是大同小异，因此在工艺试验室中作出的各种工艺参数曲线图表仍有一定的通用性，对指导电火花穿孔、成形加工仍有很大的参考指导作用。正规生产厂家提供的电火花加工机床、脉冲电源说明书中也有这类工艺参数图表，更可直接参考应用。

图 2.4-1 ~ 图 2.4-16 中，纵、横坐标均为对数坐标，以缩小并节省图形面积。图中横坐标均为脉冲宽度 t_i，t_i = 2 ~ 1 800 μs，各曲线由下向上、由左向右分别标注由小至大的脉冲峰值电流 $\hat{i}_e$，$\hat{i}_e$ = 2 ~ 200 A。脉冲峰值电流是该电火花规准电火放电瞬时的脉冲电流最大值，与电流表上测得的平均值的加工电流不同。粗、中、精不同加工规准的脉冲峰值电流可从电控柜的使用说明书中查得，是由并联的功率放大级晶体管个数决定的。

各图中并未标明脉冲间隔 t_0，这是因为脉冲间隔只要不是选得过大或过小，能保证消电离、稳定加工，不致引起电弧放电即可，它对表面粗糙度、单边放电间隙、电极损耗率等没有太大的直接影响。实际上，精加工时 t_0 = 10 ~ 30 μs，中加工时 t_0 = 30 ~ 60 μs，粗加工时 t_0 = 60 ~ 100 μs，大面积、深加工、排屑不良时，t_0 可适当放大些。各图中也未说明工具电极的抬刀高度和抬刀频率等参数，也未表明工作液煤油的冲油压力和流量等条件，因为这些参数和条件主要是为了促进放电间隙中的排屑，保证电火花加工的稳定性，除了对加工速度有所影响外，对其他工艺指标影响不太大。

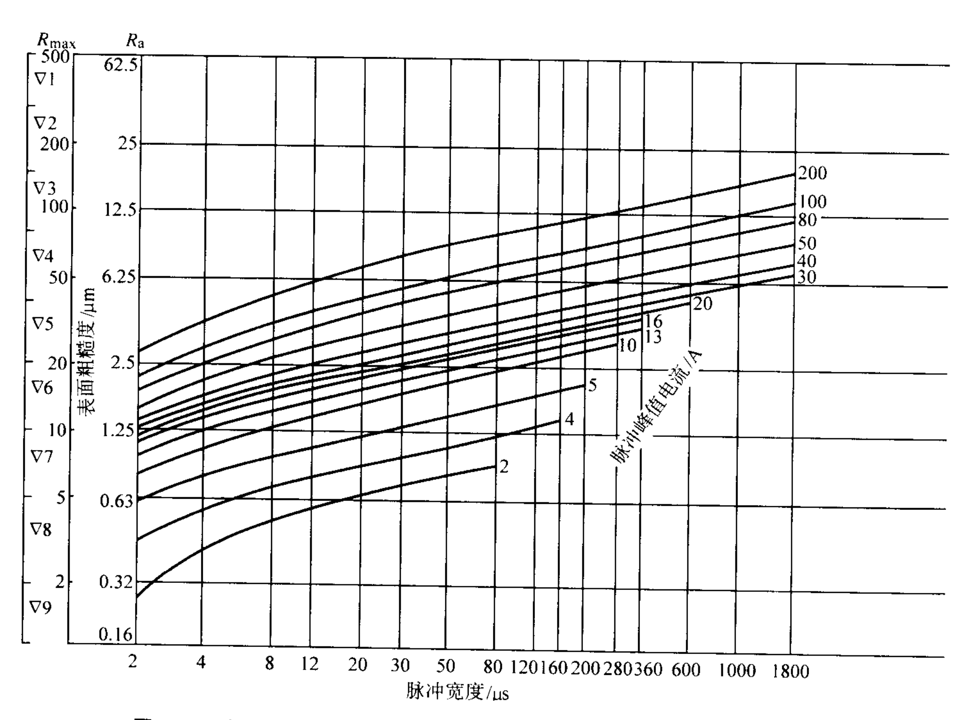


图 2.4-1　铜 +、钢 − 时脉冲宽度和脉冲峰值电流与表面粗糙度的关系曲线



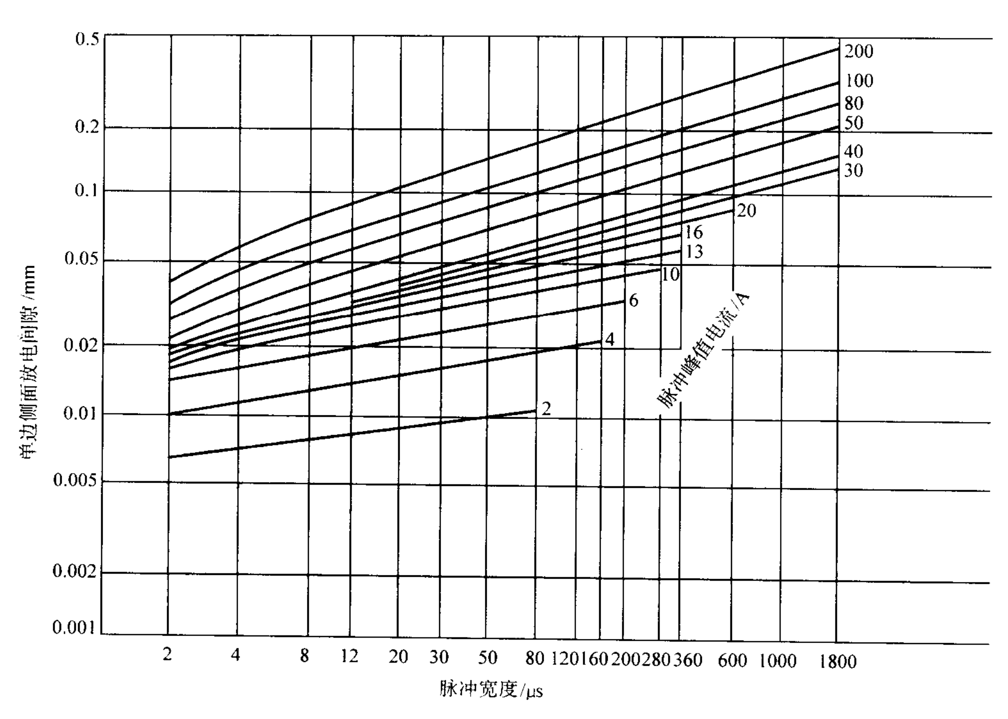


图 2.4-2　铜 +、钢 – 时脉冲宽度和脉冲峰值电流与单边侧面放电间隙的关系曲线

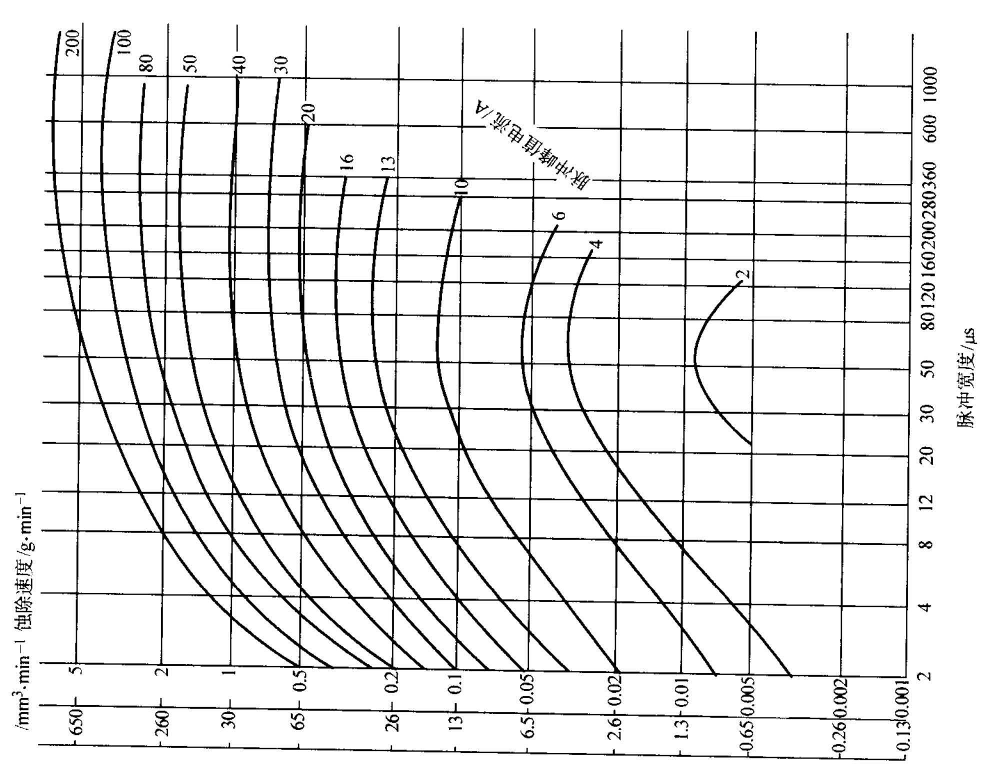


图 2.4-3　铜 +、钢 – 时脉冲宽度和脉冲峰值电流与工件蚀除速度的关系曲线

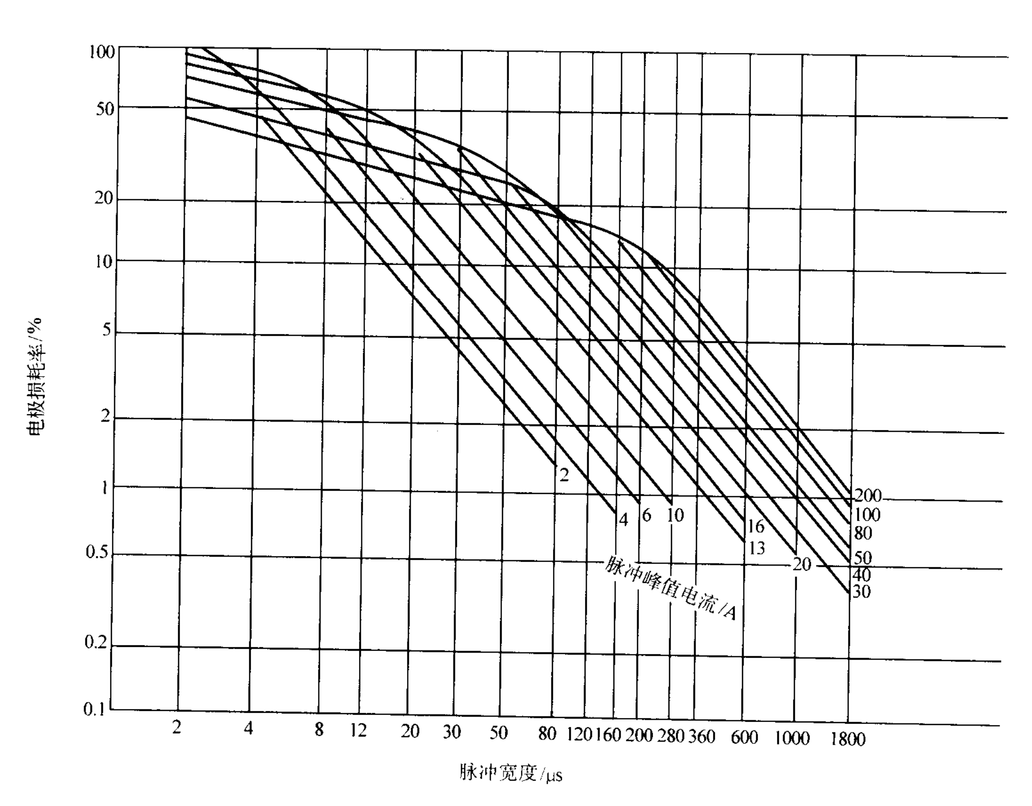


图 2.4-4 铜 +、钢 – 时脉冲宽度和脉冲峰值电流与电极损耗率的关系曲线

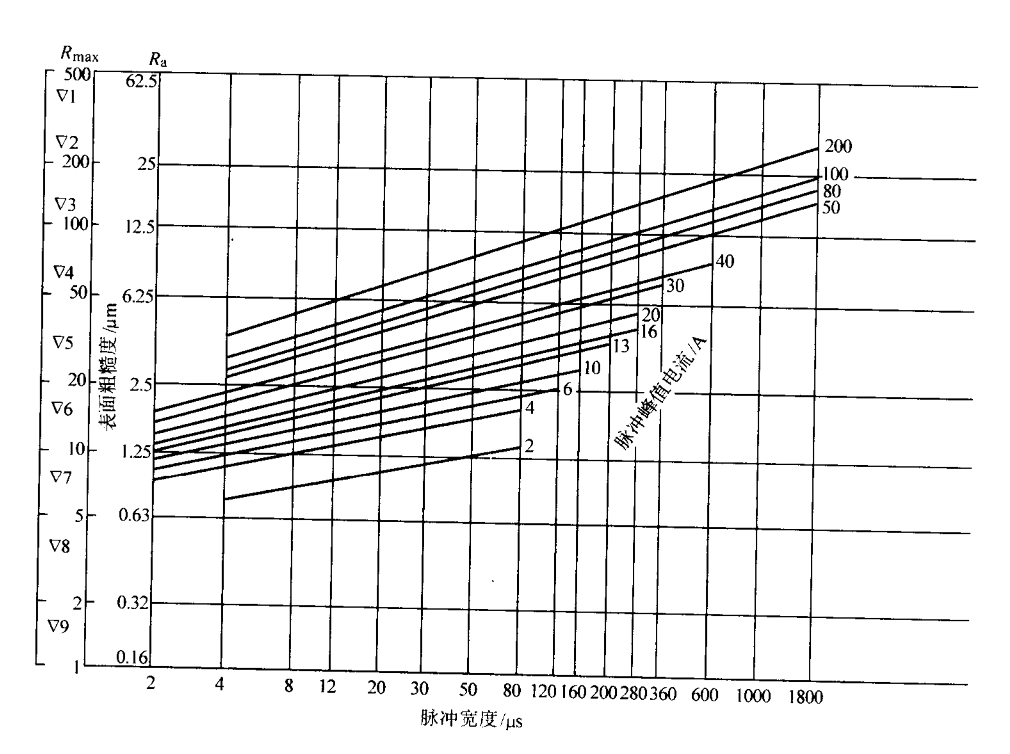


图 2.4-5 石墨 +、钢 – 时脉冲宽度和脉冲峰值电流与表面粗糙度的关系曲线



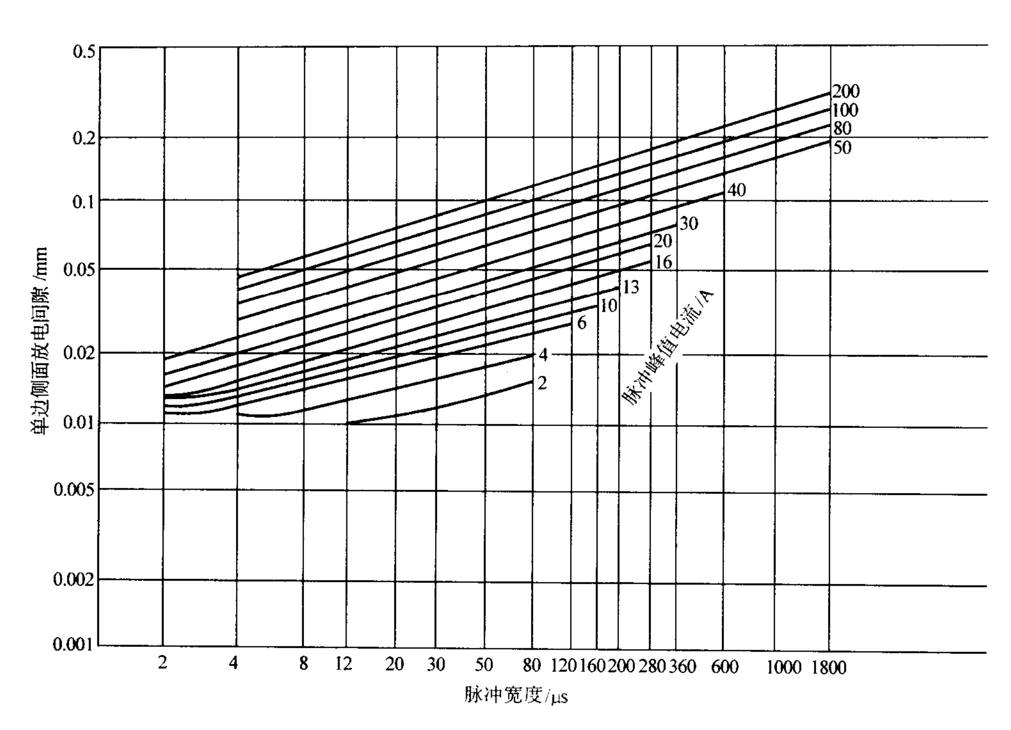


图 2.4-6　石墨 +、钢 – 时脉冲宽度和脉冲峰值电流与单边侧面放电间隙的关系曲线

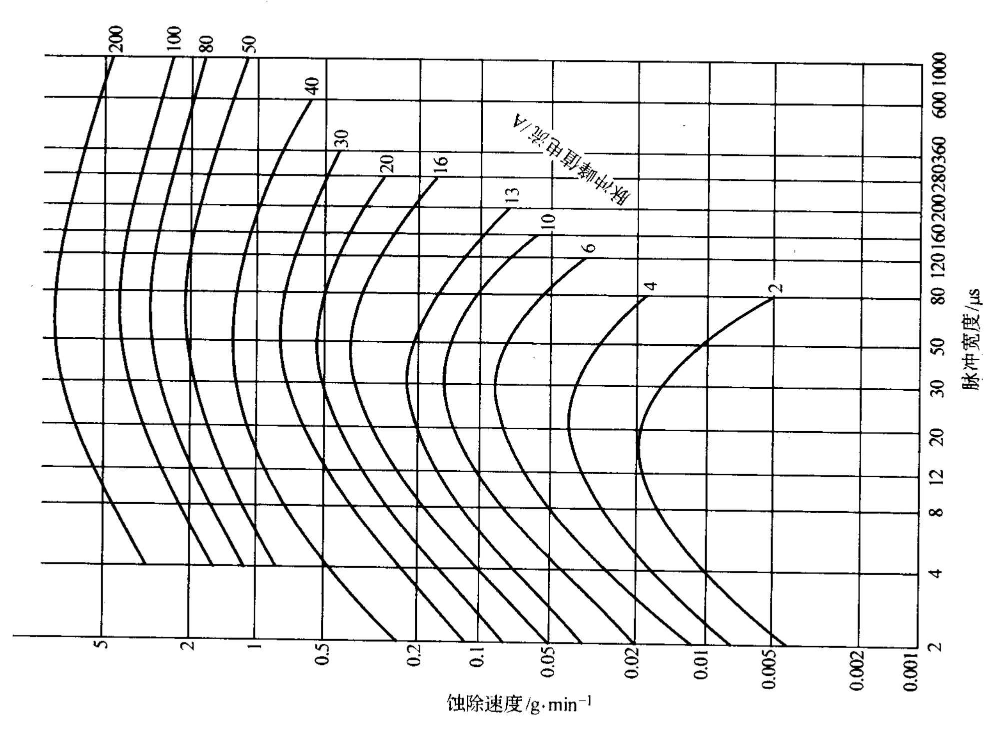


图 2.4-7　石墨 +、钢 – 时脉冲宽度和脉冲峰值电流与工件蚀除速度的关系曲线



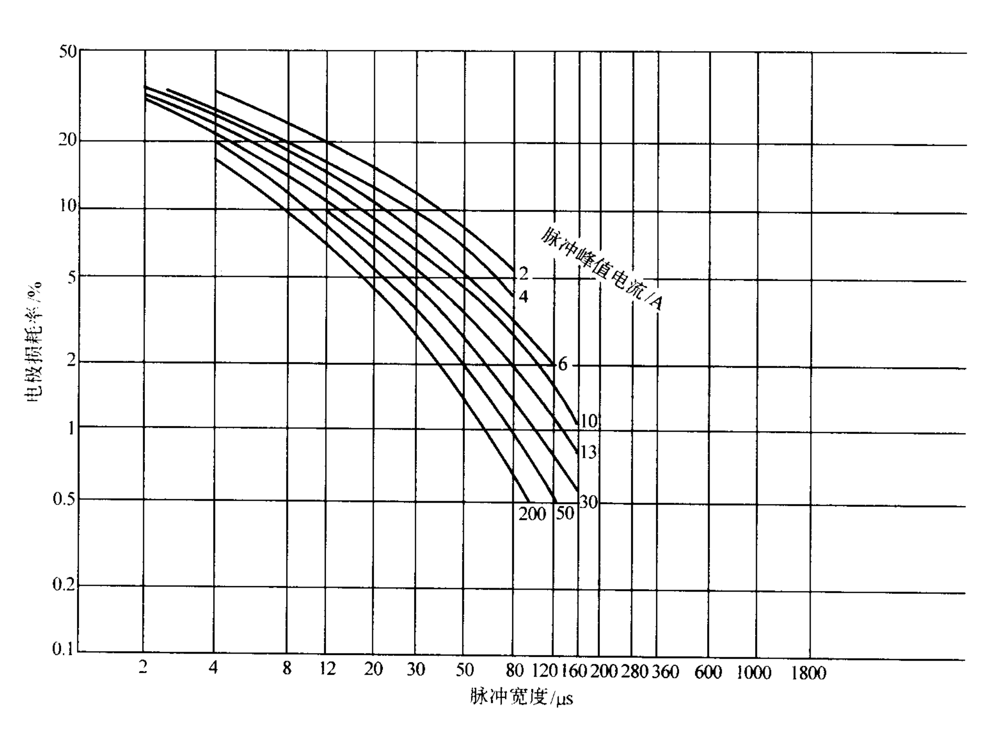


图 2.4-8 石墨+、钢−时脉冲宽度和脉冲峰值电流与电极损耗率的关系曲线

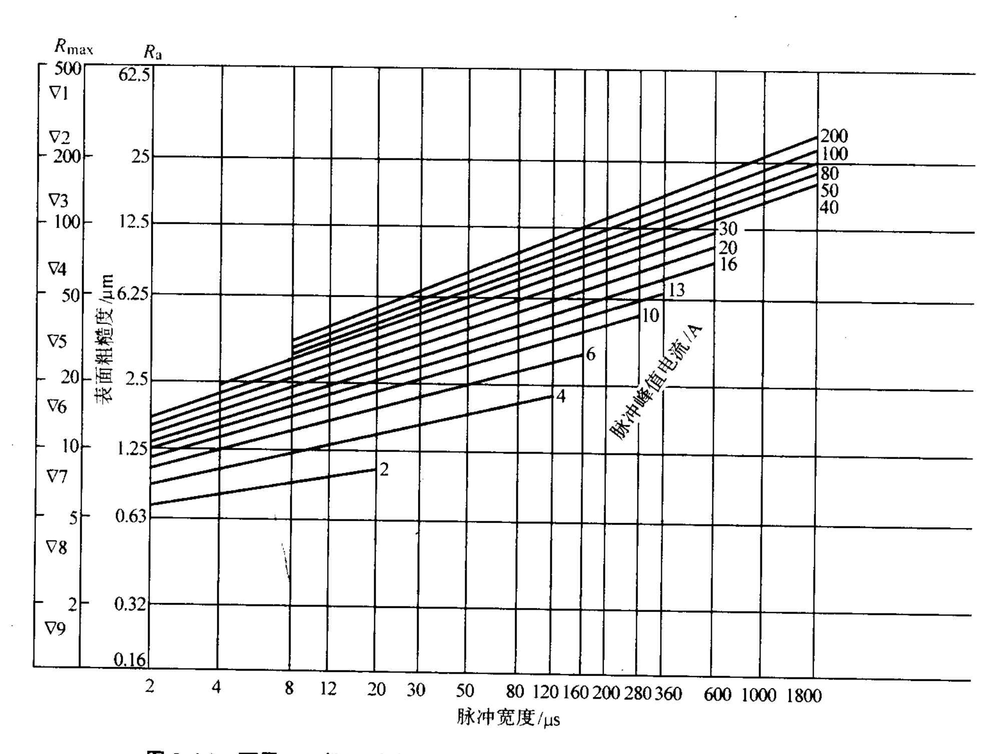


图 2.4-9 石墨−、钢+时脉冲宽度和脉冲峰值电流与表面粗糙度的关系曲线



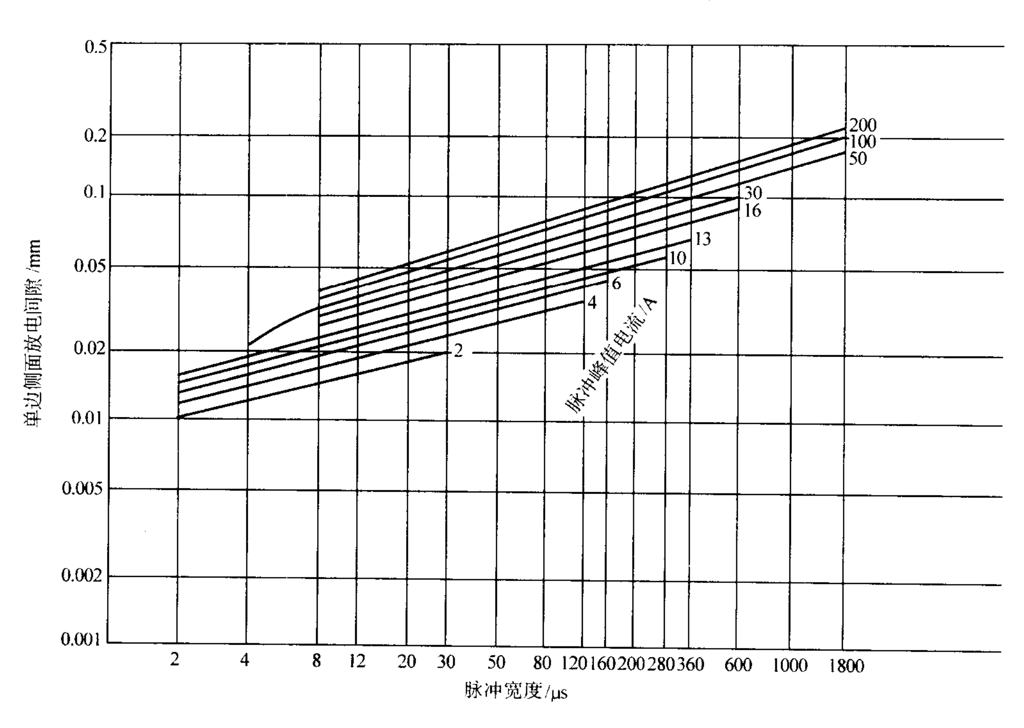


图 2.4-10　石墨 –、钢 + 时脉冲宽度和脉冲峰值电流与单边侧面放电间隙的关系曲线

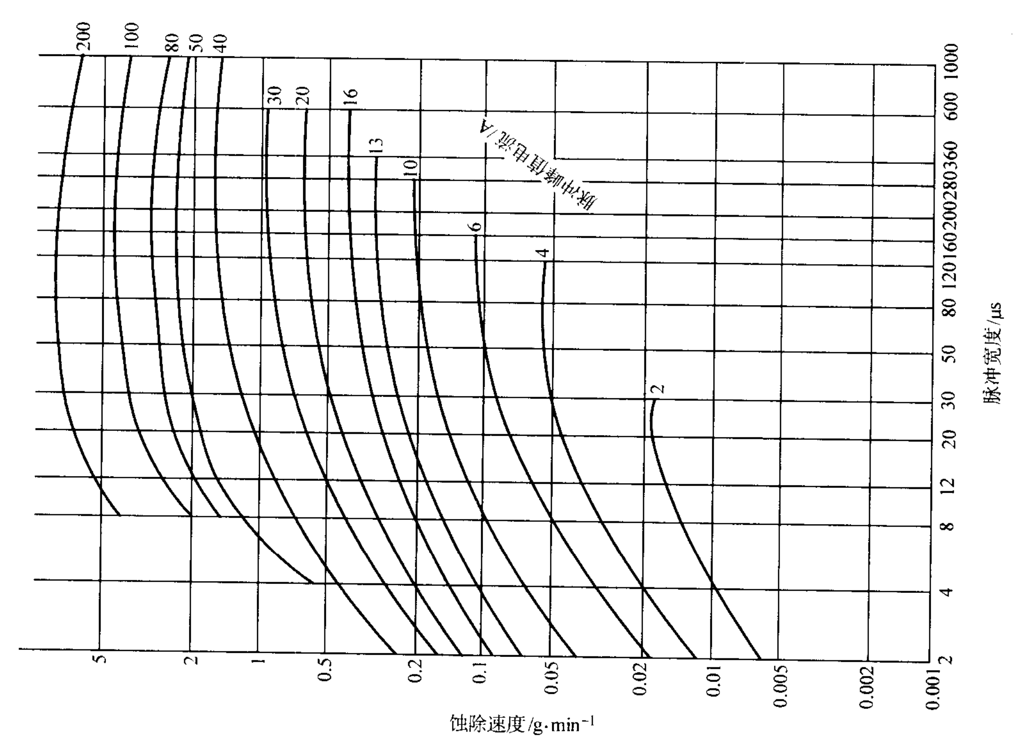


图 2.4-11　石墨 –、钢 + 时脉冲宽度和脉冲峰值电流与工件蚀除速度的关系曲线



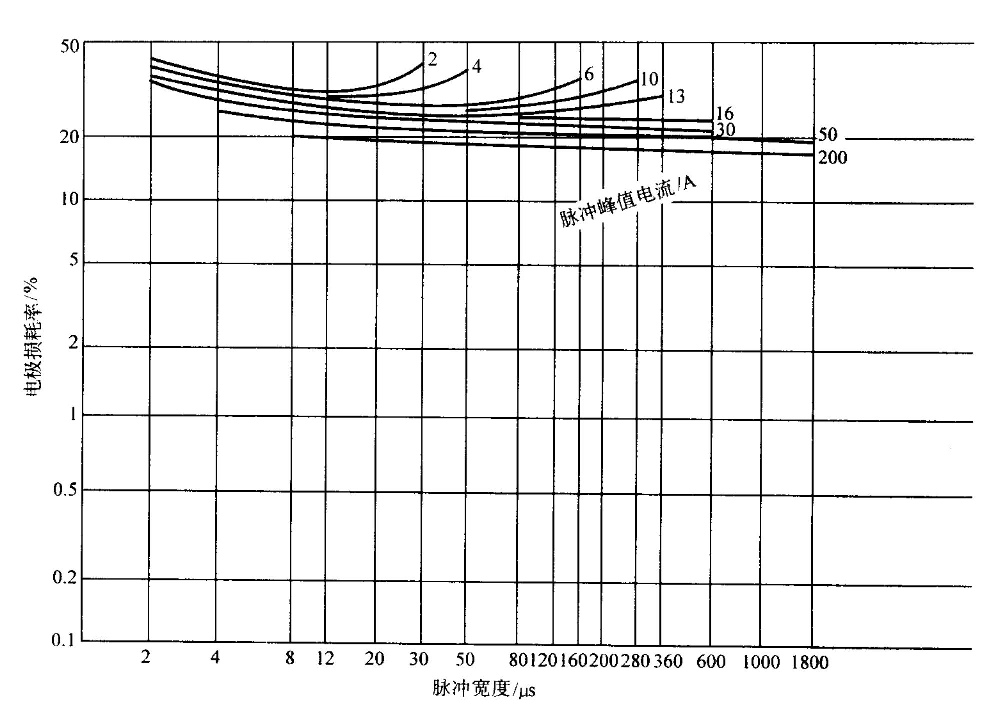


图 2.4-12 石墨－、钢＋时脉冲宽度和脉冲峰值电流与电极损耗率的关系曲线

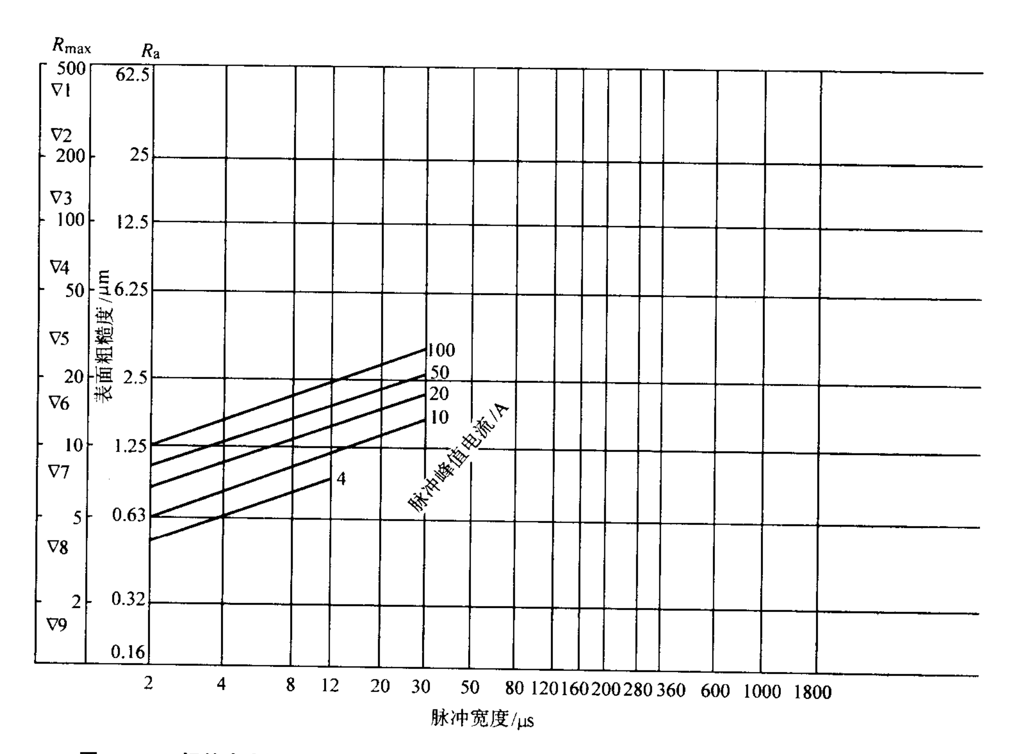


图 2.4-13 银钨合金－、硬质合金＋时脉冲宽度和脉冲峰值电流与表面粗糙度的关系曲线



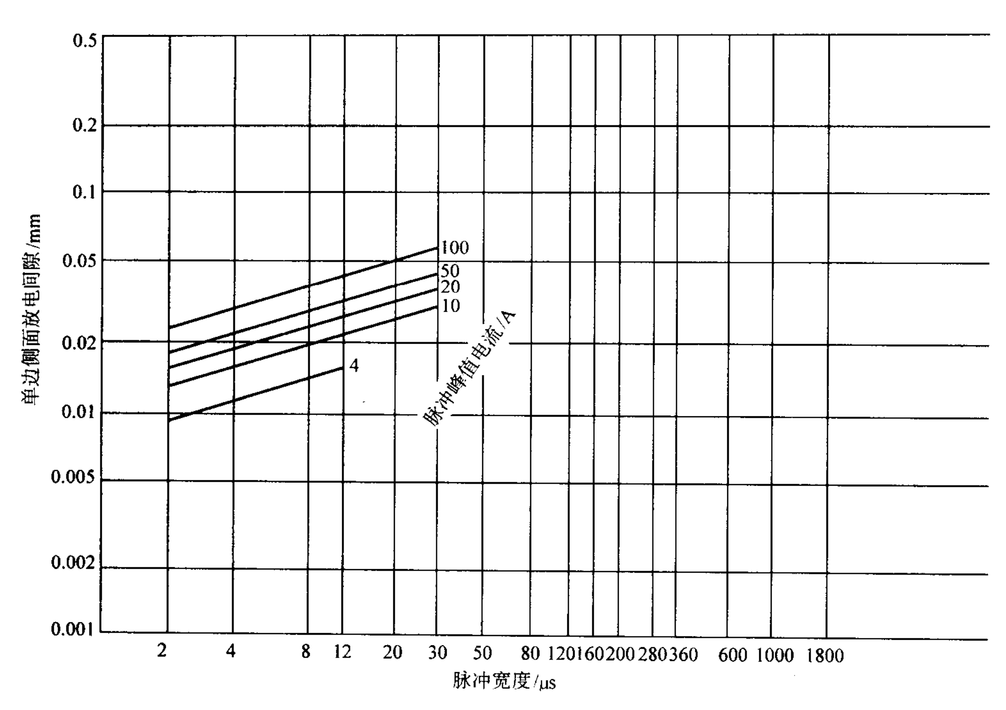


图 2.4-14　银钨合金 –、硬质合金 + 时脉冲宽度和脉冲峰值电流与单边侧面放电间隙的关系曲线

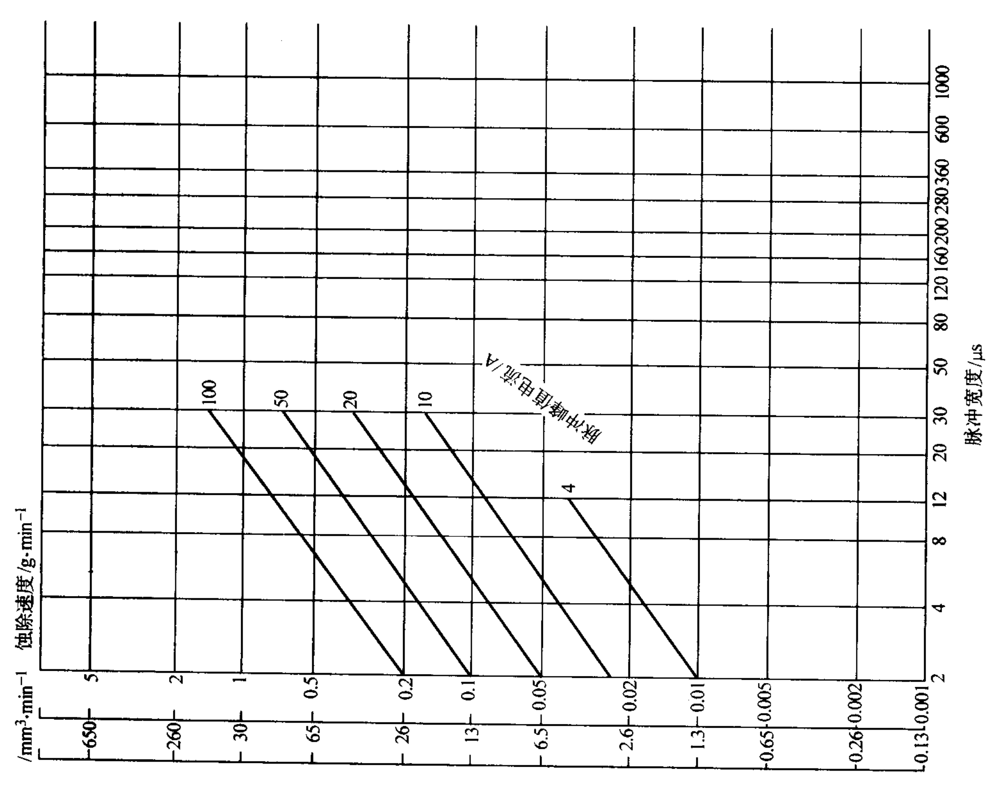


图 2.4-15　银钨合金 –、硬质合金 + 时脉冲宽度和脉冲峰值电流与工件蚀除速度的关系曲线

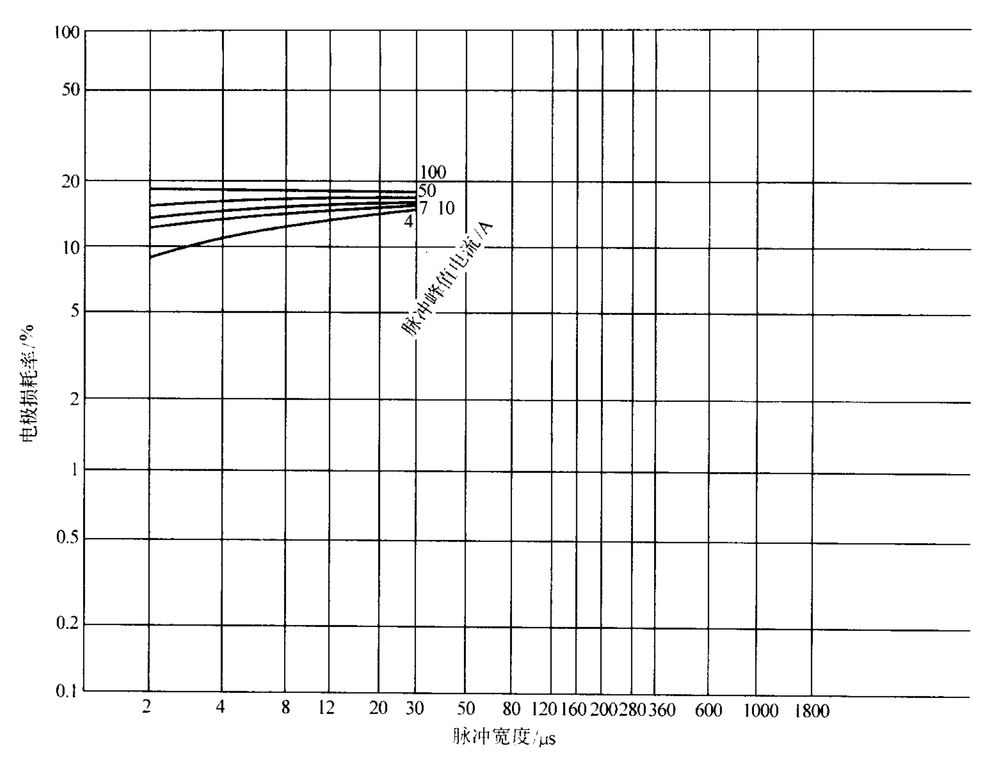


图 2.4-16　银钨合金 –、硬质合金 + 时脉冲宽度和脉冲峰值电流与电极损耗率的关系曲线

2　材料、脉宽、峰值电流与表面粗糙度的关系

图 2.4-1 给出了工具电极为铜（纯铜）、加工工件材料为钢（模具钢或其他合金钢）、负极性（工件接负极）加工时，脉冲宽度和脉冲峰值电流与工件表面粗糙度的关系曲线。

由图可见，要获得较好的表面粗糙度（较小的 R_{max} 或 R_a 值），只有选用较窄的脉宽和较小的峰值电流，其中峰值电流的影响比脉宽稍大［参见式（2.3-8）］。值得注意的是，要达到同一表面粗糙度 R_a，例如 $R_a = 1.25\ \mu m$，有好多组参数可以选择。例如，选择较窄的脉宽和较大的峰值电流（脉宽 4 μs，峰值电流 10 A）；或选择较大的脉宽、较小的峰值电流（脉宽 120 μs，峰值电流 4 A）；也可选择中等的脉宽和中等的峰值电流（脉宽 25 μs、峰值电流 6 A）。在表面粗糙度 R_a 为 1.25 μm（$R_{max} = 10\ \mu m$）的一条水平线上，有多种脉宽、峰值电流的组合可以选择，但是不同组合的脉宽、峰值电流的蚀除速度和电极损耗率是不一样的，有时甚至差别很大。例如，上述脉宽 4 μs、峰值电流 13 A 的蚀除速度约为 8 mm^3/min，而脉宽 120 μs、峰值电流 4 A 的蚀除速度只有约 3.5 mm^3/min（参见图 2.4-3）。它们的电极损耗率指标相差得更大，前者的电极损耗率高达 60%，而后者仅 1.1%（参见图 2.4-4）。可见规准选择不能草率，而应三思而行，多作分析比较，抓住工艺中的主要矛盾作出最后选择，必要时分成粗、中、精多次加工。

图 2.4-5 为不同材料石墨 +、钢 – 时脉冲宽度和脉冲峰值电流与表面粗糙度的关系曲线。

图 2.4-9 为石墨 –、钢 +（极性不同，正极性加工）时脉冲宽度和峰值电流与表面粗糙度的关系曲线。

图 2.4-13 为银钨合金 –、硬质合金 + 时脉冲宽度和脉冲峰值电流与表面粗糙度的关系曲线。

由以上四图可见，虽然材料、极性不同，脉宽和峰值电流对工件表面粗糙度的影响趋势是类似的，即脉宽窄、峰值电流小（单个脉冲能量小），其加工后的表面粗糙度值小（好），反之表面粗糙度值大（差）。

3　材料、脉宽、峰值电流与单边放电间隙的关系

图 2.4-2 为铜 +、钢 – 时脉冲宽度和脉冲峰值电流与单边侧面放电间隙的关系曲线。因电火花加工时，底面的放电间隙由于工具电极经常在进进退退地伺服进给，因此，间隙值不是一个稳定值，而且很难测量，故而图中采用单边侧面间隙，这对冲模等需要有配合精度时更有重要的实用意义。

由图 2.4-2 可见，它的规律和表面粗糙度类似，脉宽窄、峰值电流小，可以获得较小的侧面间隙，反之则侧面间隙较大。侧面间隙大，不利于电火花加工的仿形精度。一般情况下，侧面间隙是电火花加工时由底面间隙中产生的电蚀产物金属小屑等二次放电所形成的，因此侧面间隙会稍大于底面间隙的平均值。要获得精确的或有配合精度的侧壁尺寸，可以采用平动头或数控摇动工艺来修正。

图 2.4-6 为石墨 +、钢 – 时脉冲宽度和脉冲峰值电流与单边侧面放电间隙的关系曲线。

图 2.4-10 为石墨 –、钢 + 时脉冲宽度和脉冲峰值电流与单边侧面放电间隙的关系曲线。

同样，图 2.4-14 为银钨合金 –、硬质合金 + 时脉冲宽度和脉冲峰值电流与单边侧面放电间隙的关系曲线。

4　材料、脉宽、峰值电流与蚀除速度的关系

图 2.4-3 为铜 +、钢 – 时工件蚀除速度与脉冲宽度和脉冲峰值电流的关系曲线。与图 2.4-1、图 2.4-2 有所不同，随着脉宽和脉冲峰值电流的增大，工件的蚀降速度也随之增大，但逐渐减慢增大速度，到脉宽增至 50 μs 左右，峰值电流在 2 ~ 10 A 时，蚀除速度达到最大值，呈一上凸的高峰。脉宽超过 50 μs 以后，蚀除速度即渐趋于饱和而不再增加。

需要注意的是图中没有表明对蚀除速度有较大影响的脉间和抬刀以及加工深度等参数。过长的脉间会使蚀除速度成比例地减少，但脉间过小会使排屑不畅引起电弧放电。加工到一定的深度后应使工具电极定时抬刀排屑，尤其是中、精



加工时，虽然抬刀停止了火花放电，会降低单位时间内的蚀除速度，但这是为了稳定加工所必须的。图 2.4-3 中的曲线是在合理的、较小的脉间、较浅或很浅的加工深度、无抬刀运动、中等加工面积和微冲油或不冲油的稳定加工条件下作出的。实际使用中应根据抬刀、冲油、加工面积等适当予以修正。

同样，图 2.4-7 为石墨 + 、钢 - 时脉冲宽度和脉冲峰值电流与工件蚀除速度的关系曲线。

图 2.4-11 为石墨 - 、钢 + 时脉冲宽度和脉冲峰值电流与工件蚀除速度的关系曲线。

图 2.4-15 为银钨合金 - 、硬质合金 + 时脉冲宽度和脉冲峰值电流与工件蚀除速度的关系曲线。由图可见，硬质合金的熔点、气化点很高，故蚀除速度较低。

5　材料、脉宽、峰值电流与电极损耗率的关系

图 2.4-4 为铜 + 、钢 - 时脉冲宽度和脉冲峰值电流与电极损耗率的关系曲线。由图可见，在负极性加工时，只有在大的脉宽和相对较小的脉冲峰值电流时，才能得到很低（< 1%）的电极损耗率，如图右下方所示，这是因为极性效应的缘故，即脉宽长时正离子对负极工件的撞击作用较大，此外，正的工具电极表面又吸附了一层炭黑膜起保护作用所致。负极性、长脉宽、粗加工时可以获得电极低损耗率，这点对型腔加工非常有实用价值，可以用一个电极加工掉很大余量而电极尺寸形状基本不变，然后再转入中、精加工。中、精加工则相反，脉宽窄，正极工具表面吸附的炭黑很少，抵挡不住负电子对正极的强烈冲击，因此损耗比会增大（参见 8.3 节）。好在中、精加工时留的余量较小，电极的绝对损耗量也就不大，可以用一个工具电极加工出一个型腔。

图 2.4-8 为石墨 + 、钢 - 时脉冲宽度和脉冲峰值电流与电极损耗率的关系曲线图，与铜 + 、钢 - 时类似，长脉宽、小电流时可获得小于 1% 的电极损耗率。

图 2.4-12 为石墨 - 、钢 + （正极性加工）时脉冲宽度和脉冲峰值电流与电极损耗率的关系曲线图。由于钢接正极，所以很难获得小的电极损耗率。

图 2.4-16 为银钨合金 - 、硬质合金 + 时脉冲宽度和脉冲峰值电流与电极损耗率的关系曲线。由于硬质合金很难加工，因此使用银钨合金也很难使电极损耗率小于 10%。

6　正确选择电火花加工工艺参数规准的方法

电火花加工模具或某种零件时，一般工件材料是事先已定的，碳钢、模具钢、不锈钢及各类镍铬合金钢等都可算作钢类材料，对电火花加工来说，它们的被加工性能、工艺指标都相差不多。含熔点、气化点很高的钨、钼类合金材料，以及硬质合金材料（含碳化钨、碳化钛）及石墨、铜钨、银钨烧结材料、导电的聚晶金刚石等可算作另一类，对电加工来说它们属于难加工材料。对铝、锌、黄铜等熔点较低的材料，电火花加工比较容易。总之，第一步就是在分析工件的特点和技术要求（如表面粗糙度、尺寸、公差精度）等工艺技术指标的基础上，根据工件材料和技术要求来选择工具电极的材料，如黄铜、纯铜、石墨或铜钨、银钨合金等，当然要考虑它们是否易于加工制作成工具电极及成本等因素。

以后就是选择加工极性等工艺参数规准，大部分工件一般要分成粗、中、精几种规准依次转换，既保证工件的技术要求，又保证尽可能高的总的生产效率。选择电规准的顺序应根据主要矛盾来决定。例如加工型腔模具，电极损耗比必须低于 1%，应选按图 2.4-4 或图 2.4-8，根据要求的电极损耗比来选择粗加工时的脉宽 t_i 和峰值电流 $\hat{i}$。这时把生产率、表面粗糙度等放在次要地位来考虑。型腔精加工时，则又需按表面粗糙度（图 2.4-1 的曲线）来选择 t_i 和 $\hat{i}_e$。

又如加工精密小模数齿轮冲模，除了侧面粗糙度外，主要还应考虑选择合适的放电间隙，以保证所规定的冲模配合间隙，这样就需根据图 2.4-1 和图 2.4-2 来选择 t_i 和 $\hat{i}_e$。

如果是加工预孔或去除断丝锥等精度要求不高的加工，则可按图 2.4-3 选取最高生产率的脉冲参数 t_i 及 $\hat{i}_e$。

脉冲间隔时间 t_0 的选择，粗加工长脉宽时取脉宽的 1/5 ~ 1/10，精加工时取脉宽的 2 ~ 5 倍。脉间大，生产率低；但脉间过小，则加工不稳定，易拉弧。

加工面积小时不宜选择过大的峰值电流，否则会使电极间隙内电蚀产物过浓而造成放电集中，易于拉弧。表 2.4-1 为不同工具电极材料加工钢时可采用的最大电流密度。为了防止可能引起的电弧放电，实际采用较保守的电流密度，常低于表中的最大值。一般小面积时以保持 3 ~ 5 A/cm^2，大面积时保持 1 ~ 3 A/cm^2 的视在电流密度为宜。因此，在粗加工刚开始时可能实际加工面积很小，应暂时减少峰值电流或加大脉冲间隔，或故意加强定时抬刀，待电火放电面积逐渐增大后，再逐步增大电流至正常值。随着加工深度的逐渐增加，也应相应加强抬刀和冲、抽油排屑功能。

表 2.4-1　加工钢时可采用的最大电流密度

工具电极材料（极性）	电流密度/$A\cdot cm^{-2}$
Cu（+）	15 ~ 25
Cr（+）	10 ~ 12
Cr（-）	6 ~ 8
CuW（+或-）	8 ~ 15
硅铝明合金（+）	2 ~ 5

近年来有些先进的电火花成形机床及其脉冲电源利用数据库技术，可以根据加工材料和电极材料、加工面积以及表面粗糙度、尺寸精度等要求自选电火花加工参数，有的还能通过计算机自动设置（更改）电火花加工参数，使之始终处在较好的加工状态。

编写：刘晋春（哈尔滨工业大学）
郭永丰（哈尔滨工业大学）
刘　华（哈尔滨工业大学）

第5章　电火花成形加工机床

1　电火花成形加工机床主机及附件

图2.5-1为常见的单轴数控电火花成形加工机床外形。

图2.5-2a为常见的三轴数控电火花成形加工机床外形，主要由主机、电源箱、工作液循环过滤系统三大部分组成；图2.5-2b为三轴数控电火花成形加工机床结构的总装图。

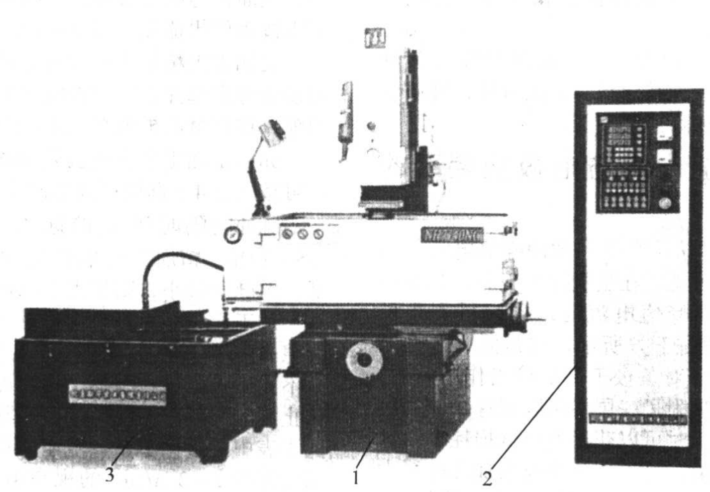
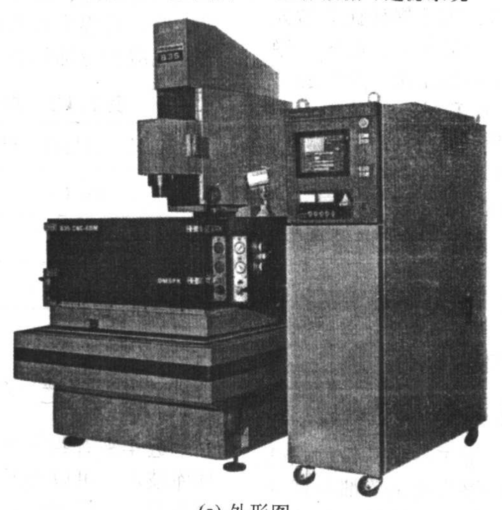
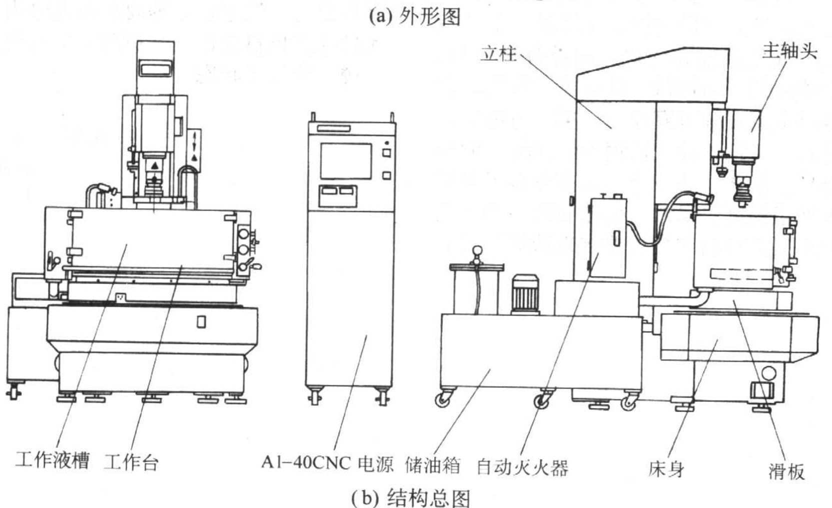


图2.5-1　单轴数控电火花成形加工机床外形图

1—主机；2—电源箱；3—工作液循环过滤系统



(a) 外形图



(b) 结构总图

图2.5-2　三轴数控电火花成形加工机床



主机用于支承工具电极及工件，保证它们之间的相对位置，并实现电极在加工过程中稳定的进给运动。主机主要由床身、立柱、主轴头、工作台及润滑系统等组成。电源箱包括脉冲电源、自动进给控制系统和其他电气系统。工作液循环过滤系统包括液压泵、过滤器，以及各种控制阀、管道等。

1.1　电火花成形加工机床主机

1.1.1　概述

（1）电火花成形加工机床主机结构的发展

电火花成形加工机床主机结构的发展与驱动电动机、滚动导轨和滚珠丝杠的不断更新，数控化系统（计算机、芯片等）的不断发展有着密切的关系。它主要取决于机床的核心部件——主轴（对于数控机床指 X、Y、Z 各轴）驱动部分的结构变化。为了提高主轴的加工性能，电火花加工技术开创 50 多年以来，主机结构主要经过了几次较大变革。

1）电磁振动和电动悬浮式调节器驱动机构　最早采用电磁线圈悬浮式调节器加电磁振动头。在 20 世纪 60 年代初，电火花成形加工机床用于取折断的丝锥、钻头和加工精度较低的锻模型腔等。

2）变速电动机加减速机构　当时的伺服电动机的低速特性及转矩输出特性都不好，为实现平稳低速运动，就需要齿轮多级减速，其减速比约为 1 000 左右，如此大的减速比带来的传动间隙和很窄的调速范围，使伺服灵敏度很差，要配上振动头才能勉强工作，故加工效率极低。其传动结构一般为电动机 + 齿轮减速器 + 滑动丝杠螺母的驱动机构 + 电磁振动头。

3）电液压伺服驱动机构　20 世纪 70 年代，为加工较为精密的冲模，特别是用钢冲头直接加工凹模，出现了电液压控制的主轴结构。这种结构具有灵敏度高、传动链中无间隙、承载能力大、惯性小、低速特性好、调速范围宽、工作死区小等优点。当时的考核指标是：速度在 0.2 ~ 300 mm/min 可调，死区控制电流小于 1%。这种结构需带单独的液压控制系统，结构复杂，在使用过程中不可避免地会出现噪声和漏油。

4）步进电机 + 自制滚动导轨和丝杠的结构　20 世纪 80 年代，电火花成形加工机床进入数控时代，由于数控铣床、加工中心的巨大发展，电动机伺服系统有了长足进步，电火花成形加工机床开始采用步进电机进行主轴数控。由于步进电机实现数控化很简单，价格也合适，使电火花成形加工机床出现了突破性的发展。但步进电机调速范围仍感不足，且在结构中仍需齿轮减速，在制造和安装中稍有不慎，传动中就会出现丢步，不能实现高精密数控加工。

5）直流伺服电动机 + 滚动导轨和滚珠丝杠的直拖结构或交流伺服电动机 + 滚动导轨和滚珠线杠的直拖结构　在 20 世纪 80 年代末 90 年代初，出现了高性能的伺服电动机，不管是直流电动机还是交流电动机，低速性能和调速范围都优于步进电机，再加上配置不同的编码器，可实现 1 μm/脉冲，最大移动速度 3 m/min 的运动。同时滚动元件技术的发展，对主机结构的进步又起了推动作用。过去的主轴进给通常用滑动丝杠和滑动导轨，少数用滚动导轨还是自制的，且制做困难，性能也不十分稳定。滑动丝杠和导轨的摩擦力比滚动丝杠和导轨大得多，反向间隙难以避免，低速爬行反应迟钝，且对丝杠和导轨的安装精度要求高，要保证全行程都灵活运动相当难。随着滚动元件的标准化和在常规机床上的广泛应用，性能价格比日趋合理，滚动导轨和滚珠丝杠在主机的结构设计中将成为主轴传动的固定配置，这有利于提高主轴的伺服性能，简化结构设计，完成工件的低损耗粗加工、镜面加工和微细型腔加工。

6）直线电机高速、高灵敏度伺服驱动的直拖结构　1996 年日本沙迪克公司率先将直线电机用在电火花成形加工机床的主轴和工作台上，省去了滚珠丝杆螺母结构，实现了高速、高灵敏度伺服驱动的直拖结构，使主机结构又发生了质的变化。

电火花成形加工机床先后经历了几次较大的变革，每一次驱动结构的变革，都使电火花加工的性能跃上一个新的台阶。目前第一种、第二种驱动结构的机床已基本淘汰，本章主要介绍直流伺服电动机、交流伺服电动机 + 滚珠丝杠的普通电火花成形加工机床、单轴数控电火花成形加工机床和三轴数控电火花成形加工机床，以及最新发展的直线电动机驱动的电火花成形加工机床结构。

（2）电火花成形加工机床的分类和机床的结构形式

目前，电火花成形加工机床已形成系统产品，按不同的定义其分类方法也不同。按国家标准分类可分为单立柱机床（十字工作台型和固定工作台型）和双立柱机床（移动主轴头型和十字工作台型）；按机床主参数尺寸分类可分为小型机床——工作台宽度不超过 250 mm（D7125 以下）、中型机床——工作台宽度为 250 ~ 630 mm（D7125 ~ D7163）、大型机床——工作台宽度为 630 ~ 1 250 mm（D7163 ~ D71125）和超大型机床——工作台宽度大于 1 250 mm（D71125 以上）；按数控程度分为普通手动机床、单轴数控机床和多轴数控机床；按精度等级分为标准精度机床和高精度机床；按工具电极的伺服进给系统的类型分为液压进给、步进电机进给、直流或交流伺服电动机进给和直线电动机进给驱动等类型机床；还可按应用范围分为通用机床和专用机床（航空叶片零件加工机床、螺纹加工机床、轮胎橡胶模加工机床等）。随着模具工业的需要，国内外已大批生产计算机控制的三轴（或多于三轴）数控电火花成形加工机床，以及带工具电极库能按程序自动更换电极的电火花加工中心。国内北京迪蒙斯巴克工控技术有限公司、汉川机床厂、北京阿奇公司和苏州电加工机床研究所等已生产出三轴数控电火花成形加工机床并在国内外市场销售。

电火花成形加工机床结构有多种形式，根据不同加工对象，机床的结构形式有如下几种。

1）“C”形结构　该类机床的结构特点是：床身、立柱、主轴头、工作台构成一“C”字形（如图 2.5-3 所示）。优点：结构简单，制造容易，具有较好的精度和刚性，操作者可从前、左、右三面充分靠近工作台。缺点：抵抗热变形能力较差，主轴头受热后易产生后仰，影响机床精度；另外，每次检测工件都必须开门放油，然后再关门上油，操作程序较复杂，容易漏油。“C”形结构较适合中、小型机床，国内机床大部分采用此种结构形式。例如北京凝华实业有限公司生产的 NH7130NC 单轴数控电火花成形机床（见图 2.5-1）、北京迪蒙斯巴克工控技术有限公司生产的 B35 精密数控电火花成形机床（见图 2.5-2）。

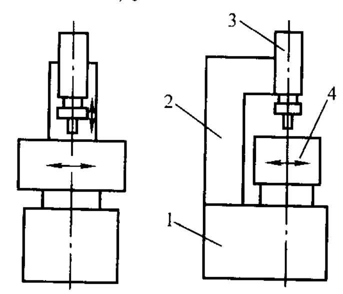


图 2.5-3　“C”形结构

1—床身；2—立柱；3—主轴头；4—工作液槽、工作台

2）龙门式结构　该类机床的结构特点是：主轴头悬挂

在一“门”式结构的立柱上，类似金属切削机床中的龙门刨床。工作台一般都固定在床身上，而主轴头可在立柱上做 *X*、*Y* 方向的移动（如图 2.5-4a 所示）。优点：机床刚性好，精度高，稳定性好，机床抵抗热变形的能力强。缺点：制造成本高，操作不太方便，占地面积大。龙门式结构适合大、中型机床采用。例如常州市第二机床厂生产的 EDM1250K 型电火花成形机床（见图 2.5-4b）。

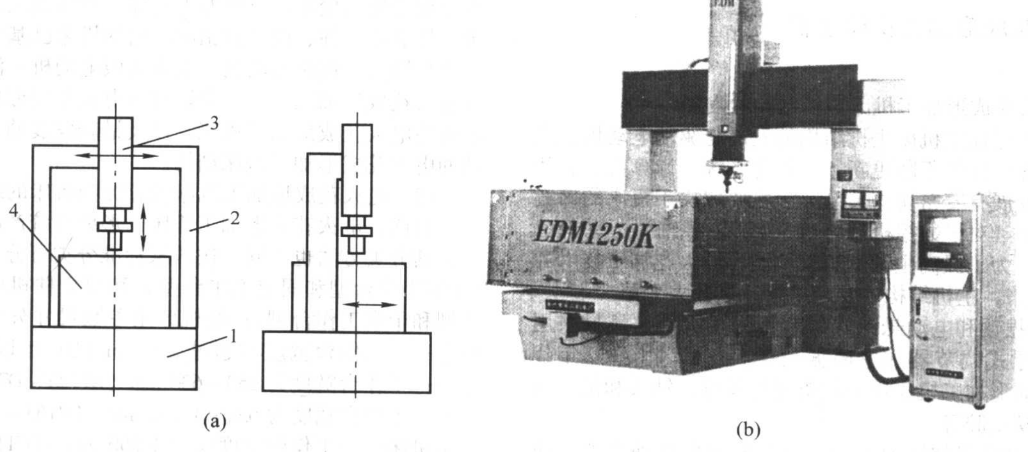


图 2.5-4　龙门式结构

1—床身；2—立柱；3—主轴头；4—工作液槽、工作台

3）牛头滑枕式结构　该类机床的结构特点是：这种结构形式类似金属切削机床中的牛头刨床。工作台固定不动，工作液槽可升降。主轴头通过十字滑枕实现 *X*、*Y* 向移动（如图 2.5-5a 所示）。优点：装卸、检测工件十分方便，容易实现自动化。当工作液槽降下时，工件完全暴露出来，可以方便地对工件进行检测，完毕后只需将工作液槽升起即可重新加工，省去了每次放油和重新上油的时间，提高了工作效率；另外，由于不需要人工开启油槽，故容易实现自动化。缺点：结构较复杂，制造成本较高，刚性不如龙门式结构。牛头滑枕式结构适合数控化程度较高的机床。例如北京阿奇夏米尔工业电子有限公司生产的 SF100 数控电火花成形机床（见图 2.5-5b）。

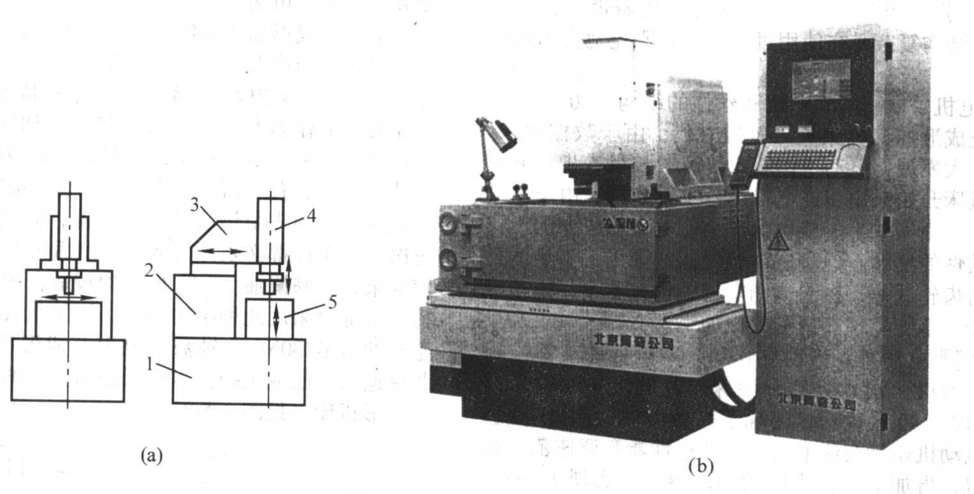


图 2.5-5　牛头滑枕式结构

1—床身；2—立柱；3—滑座；4—主轴头；5—工作液槽

4）摇臂式结构　该类机床的结构特点是：主轴头装在可以绕固定轴转动的摇臂上，工作台固定不动，工作液箱可上下升降（如图 2.5-6 所示）。优点：操作十分方便，不仅工作液槽可以落下，而且主轴头也可以迅速移开，使操作者能从前、左、后面及上面充分接近工件，方便地完成工件的装卸和检测；大模具可直接用吊车装卸。缺点：机床的刚性差、精度差。摇臂式结构机床只适用于精度要求不高的锻模加工机床。

5）台式结构　该类机床的结构特点是：床身和立柱连为一体，且主机和电源全部置于一“写字台”式的底座上（如图 2.5-7a 所示）。优点：刚度和精度都可满足要求，结构紧凑、占地面积小，容易实现机电一体化。缺点：加工范围小。台式结构机床只适用于小型机床或小型精密机床。例如北京凝华实业有限公司生产的 NH250C 台式电火花成形加工机床（见图 2.5-7b）。

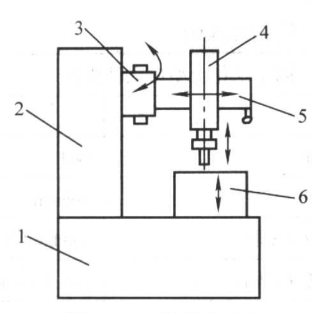


图 2.5-6　摇臂式结构

1—床身；2—立柱；3—转座；4—主轴头；5—摇臂；6—工作液槽、工作台

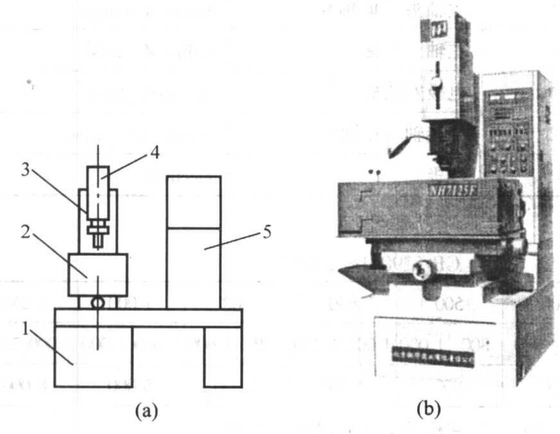


图 2.5-7　台式结构

1—底座；2—工作液槽、工作台；3—立柱；4—主轴头；5—电源箱

6）便携式结构　这种结构的机床非常简单，主要是为了取折断在大型工件中的丝锥和工具。此外，还可用来加工切削刀具上的键槽或扩孔。图 2.5-8 是北京市电加工研究所生产的 STEP－10 型便携式电火花加工机。

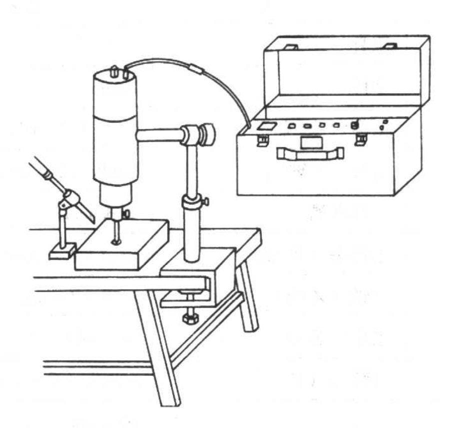


图 2.5-8　便携式结构

（3）电火花成形加工机床各主要部件名称和各传动轴名称与方向定义

1）电火花成形加工机床各主要部件名称的定义　为统一名词术语，便于沟通，国家标准对电火花成形加工机床各部分进行了定义，见图 2.5-9a、b 和表 2.5-1。

2）电火化成形加工机床各传动轴名称与方向定义　电火花成形加工机床主机有 X、Y、Z 三轴传动系统。当 Z 轴用电机伺服驱动，X、Y 轴为手动时为普通机床；只有 Z 轴数控时称单轴数控机床，当 X、Y、Z 三轴同时用电动机伺服驱动时称为三轴数控机床。C 轴（旋转伺服轴）为专用附件，可实现分度、旋转伺服加工。国家标准对各传动轴的定义与方向规定如图 2.5-10 所示。

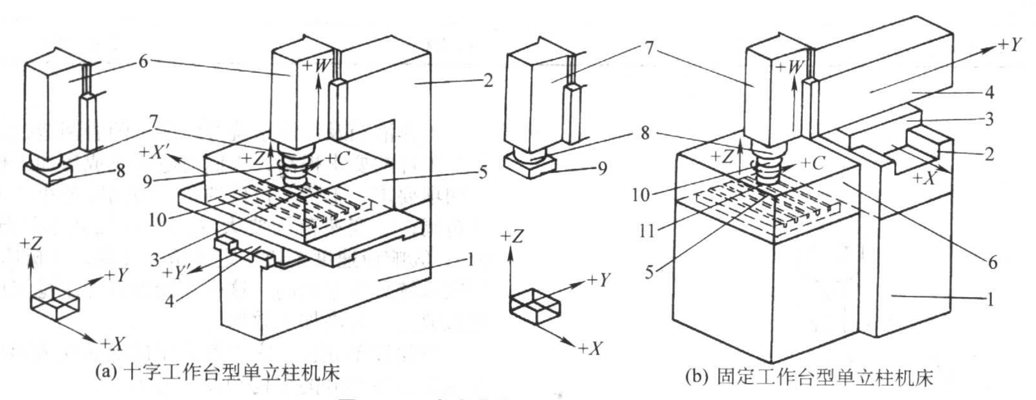


图 2.5-9　电火花成形加工机床组成部分

（各部分的名称见表 2.5-1）

Z 轴：（主轴）：主轴头上下移动轴。面对机床，主轴头移动向上为 $+Z$，向下为 $-Z$。

X 轴：工作台左右移动轴。面对机床，主轴向右（工作台向左）移动为 $+X$，反向为 $-X$。

Y 轴：工作台前后移动轴。面对机床，主轴向前（工作台向后）移动为 $+Y$，反向为 $-Y$。

C 轴：安装在主轴头下面的电极旋转伺服轴。电极逆时针方向旋转为 $+C$，顺时针方向旋转为 $-C$。

（4）国产电火花成形加工机床的型号规格

在晶体管脉冲电源没有广泛采用的 20 世纪 60～70 年代，我国早期生产的电火花穿孔加工机床（采用 RC、RLC 和电子管、闸流管等窄脉冲电源）和电火花成形加工机床（采用长脉冲发电机电源）分别命名为 D61 系列（如 D6125-D6135-D6140 型）和 D55 系列（如 D5540－D5570 型等）。20 世纪 80 年代开始大量采用晶体管脉冲电源，电火花加工机床既可用作穿孔加工，又可用作成形加工，因此 1985 年起国家把电火花成形加工机床命名为 D71 系列，见中华人民共和国机械行业标准《特种加工机床　型号编制方法》（JB/T 7445.2—1998），其型号表示方法如下：

```
D  71  32
│   │   └机床工作台宽度(以cm表示)
│   └────电火花穿孔、成形加工机床
└────────电加工机床(如为数控电加工机床，则在D后加K)
```

表 2.5-1 为电火花成形加工机床各组成部分名称的定义，表 2.5-2 为我国电火花成形加工机床的参数标准。

表 2.5-1　电火花成形加工机床各部分的定义（参见图 2.5-9）

十字工作台型单立柱机床			固定工作台型单立柱机床		
序号	中文	英文	序号	中文	英文
1	床身	bed	1	床身	bed
2	立柱	column	2	立柱	column
3	工作台（*X* 轴）	table（*X* – axis）	3	滑板（*X* 轴）	saddle（*X* – axis）
4	滑板（*Y* 轴）	saddle（*Y* – axis）	4	滑枕（*Y* 轴）	ram（*Y* – axis）
5	工作液槽	work tank	5	工作台	table
6	主轴头（*W* 轴）	head（*W* – axis）	6	工作液槽	work tank
7	主轴（*Z* 轴）	quill（*Z* – axis）	7	主轴头（*W* 轴）	head（*W* – axis）
8	电极安装板	electrode platen	8	主轴（*Z* 轴）	quill（*Z* – axis）
9	旋转轴（*C* 轴）	spindle（*C* – axis）	9	电极安装板	electrode platen
10	电极	electrode	10	旋转轴（*C* 轴）	spindle（*C* – axis）
			11	电极	electrode

表 2.5-2　电火花成形加工机床参数标准（摘自 GB 5290.1—2001）

台面宽度 *B*/mm	160		200		250		320		400		500		630		800		1 000		1 250	
台面长度 *L*/mm	250	320	320	400	400	500	500	630	630	800	800	1 000	1 000	1 250	1 250	1 600	1 600	2 000	2 000	2 500
最大工件质量/kg	25		50		100		200		400		800		1 500		3 000		6 000		8 000	
Y 轴行程/mm	80、100、125、160、200、250、320、400、500、630、800、1 000																			
X 轴行程/mm	125、160、200、250、320、400、500、630、800、1 000、1 250																			
Z 轴伺服行程/mm	80、100、125、160、200、250、320、400、500、630、800、1 000																			
电极安装板至台面距离 *H*/mm	160、200、250、320、400、500、630、800、1 000、1 250、1 600																			
最大电极质量/kg	5、10、20						50、100						250、500							

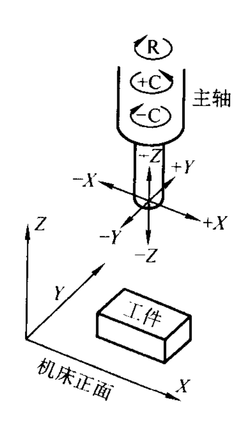


图 2.5-10　各传动轴名称与方向规定

目前国产电火花机床的型号命名往往加上单位名称的拼音代号及其他代号，如北京市电加工研究所加 B，汉川机床厂加 HC，北京凝华实业公司加 NH 等，中外合资及外资厂的型号更不统一，往往采用其自定的型号系列来表示。

1.1.2　电火花成形加工机床主机各部分的结构及其作用

电火花成形加工机床主机虽有普通手动、单轴数控、三轴数控等形式，但它们都是由床身、立柱、主轴头、工作台、工作液箱及润滑系统等组成。随着制造技术的进步和被加工工件的要求提高，人们对电火花成形加工机床主机提出了四项要求：①传动机构的正反向间隙要小、无爬行、滞后及超调；②变速范围要大（从零点几微米每分到几十米每分）；③响应速度要快、定位精度要高；④机床本身的刚性、伺服系统分辨率要高。这样才能提高加工稳定性，避免造成电弧放电，提高加工效率。

下面以单立柱十字工作台型的电火花成形加工机床主机为主介绍各部分的结构和设计要求。

（1）床身、立柱

床身和立柱是一个基础结构，由它确保电极与工作台、工件之间的相互位置。它们精度的高低对加工有直接的影响，如果机床的精度不高，加工精度也难以保证。因此，不但床身和立柱的结构应该合理，有较高的刚度，能承受主轴负重和运动部件突然加速运动的惯性力，还应能减小温度变化引起的变形。其结构示意图见图 2.5-11 中的 1、2。一般床身、立柱采用箱式整体铸件结构，在内部合理布置加强肋增强刚度和强度。数控机床的床身、立柱材料应选用球墨铸铁树脂砂铸造，毛坯应经两次时效处理消除内应力，使其不会变形，具有良好的稳定性和尺寸精度。普通机床可选用 HT200。

（2）工作台



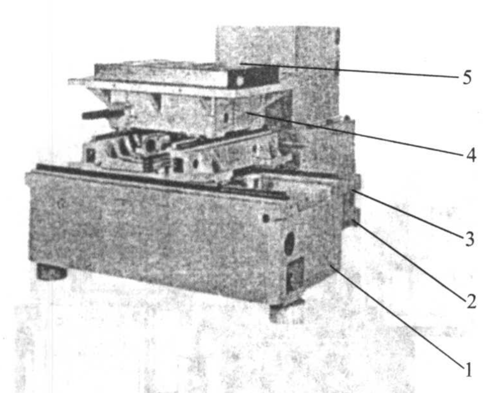


图 2.5-11　床身、立柱、工作台结构示意图
1—床身；2—立柱；3—中滑板；
4—上滑板；5—工作台

工作台主要用来支承和装夹工件，可实现横向（X）、纵向（Y）两轴的运动。在实际加工中，通过转动纵横向丝杠来改变电极与工件的相对位置。工作台上面还装有工作液箱，用以容纳工作液，使电极和被加工件浸泡在工作液里，起到冷却、排屑作用。工作台是操作者在装夹找正时经常移动的部件，通过两个手轮（或电机）来移动上下拖板，改变纵横向位置，达到电极与被加工件间所要求的相对位置。工作台可分为普通工作台和精密工作台。目前国内较好的机床已应用精密滚珠丝杠、滚动直线导轨和高性能伺服电机等结构，以满足精密模具的加工。三轴数控型电火花成形加工机床的工作台两轴由电动机驱动，侧面不再安装手轮。

工作台由中滑板、上滑板、工作台面组成，如图 2.5-11 中的 3、4、5。中滑板在床身上实现 X 方向的运动，其传动系统原理如图 2.5-12 所示。它是由伺服电机或手轮通过联轴器带动丝杠副移动，进而带动中滑板移动。双向推力球轴承和单列向心球轴承起支撑和消除反向间隙的作用。另外丝杠副也要采用消间隙结构。中滑板和上滑板实现 Y 方向的运动，其传动系统原理同 X 方向。工作台面一般和上滑板做为一体，上面有 T 形槽用于固定工件。精度要求高的机床可采用花岗岩材质的单独工作台面。这种材质具有良好的绝缘性、热稳定性和非常小的变形。

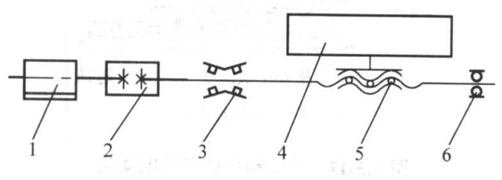


图 2.5-12　X、Y 方向的传动系统原理示意图
1—伺服电机（或手轮）；2—联轴器；3—双向推力球轴承；
4—中滑板（Y 向为上滑板）；5—丝杠副；6—单列向心球轴承

数控机床 X、Y 两轴的传动系统是由伺服电机通过联轴器和滚珠丝杠副驱动中滑板或上滑板，实现两轴高精度、高灵敏度的运动。伺服电机内置同轴码盘（编码器），以实现半闭环控制。为消除部件加工及装配过程中产生的综合误差，达到精确定位的目的，传动系统出厂前用软件进行了丝杠螺距误差补偿和反向间隙补偿，保证了数控机床有很高的定位精度（任意 100 mm 为 5 ~ 10 μm）和重复定位精度（2 ~ 5 μm）。导向部分由两根承载大、刚性高的直线滚动导轨完成。在靠近电机端部，采用了调整好的双向推力球轴承，消除反向间隙。

(3) 主轴头

主轴头是电火花成形加工机床的一个关键部件，可实现上、下方向的 Z 轴运动，是电火花成形加工的主要加工轴。它的结构是由伺服进给机构、导向和防扭机构、辅助机构三部分组成。它控制工件与工具电极之间的放电间隙。

主轴头的好坏直接影响加工的工艺指标，如生产效率、几何精度以及表面粗糙度，因此无论何种形式的主轴头除结构上不同外，还应具备以下条件：①有一定的轴向和侧向刚度及精度；②有足够的进给和回升速度；③主轴运动的直线性和防扭转性能好；④灵敏度要高，无爬行现象；⑤不同的机床要具备合理的承载电极重量的能力。不同数控程度的机床有不同的主轴头。

1）普通手动、单轴数控机床的主轴头　普通手动、单轴数控机床已普遍采用步进电动机、直流电动机或交流伺服电动机作主轴头的进给驱动元件，主轴头的伺服进给结构形式一般采用伺服电动机经同步齿形带带动齿轮减速，再带动丝杠副转动，进而驱动主轴作上下（Z 向）移动，结构示意图如图 2.5-13 所示。其导向和防扭是由矩形贴塑导轨或平面 – V 形贴塑导轨构成，导轨结合面应施加一定的预紧力以消除间隙，保证运动精度。结构示意图如图 2.5-14 所示。

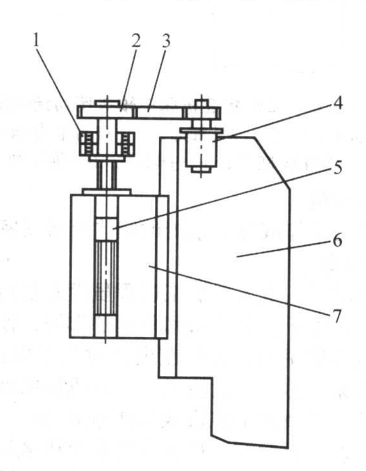


图 2.5-13　Z 方向的传动系统原理示意图
1—双向推力球轴承；2—带轮；3—同步齿形带；
4—伺服电动机；5—丝杠副；6—立柱；7—主轴头

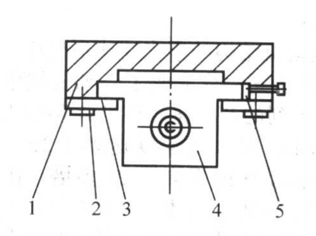


图 2.5-14　导向和防扭结构示意图
1—立柱；2—压板；3—矩形贴塑导轨；
4—主轴体；5—调整块

导轨、丝杠的组合方式有两种：①滑动导轨、滚珠丝杠副；②滚动导轨、滑动丝杠副。这种组合的优点是既保证主轴运动的灵敏度和无爬行，又有一定的阻尼，使主轴在断电停机时不会掉下砸坏工件或机床，不用单独设计抱闸结构。

主轴头移动位置的显示：①用大量程百分表直接显示加工深度，由深度机构完成；②用光栅尺和数显表示加工深度。

2）三轴数控机床的主轴头　三轴数控机床的主轴头传动结构图如图 2.5-15 所示，由交流或直流伺服电动机、联轴器、双向推力球轴承、滚珠丝杠副和主轴箱体组成。伺服电动机通过联轴器与丝杠固定，并直接带动丝杠转动，螺母与主轴箱体固定，由丝杠带动螺母及主轴箱体进行上下移动。其导向机构是通过两根直线滚动导轨完成的。由于滚珠丝杠副和直线滚动导轨都施加了预紧，采取了消间隙结构，实现了高定位精度和重复定位精度的传动。其移动位置是由



CRT 显示器显示，最小显示的数值为 1 μm。由于采用滚珠丝杠副和直线滚动导轨，主轴伺服电机内应装有抱闸装置。通电时，抱闸松开，主轴头可以实现伺服控制；断电时，抱闸吸合，主轴锁定。

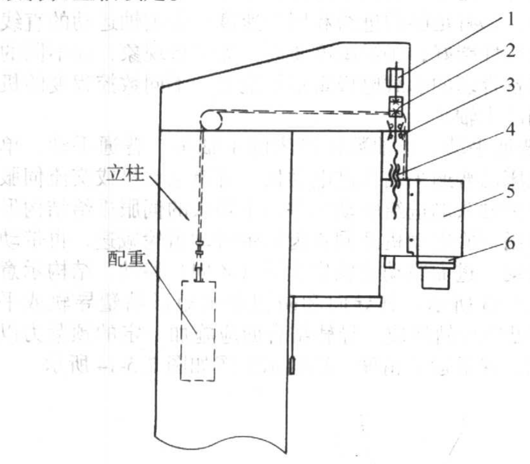


图 2.5-15　三轴数控机床主轴头传动结构图
1—伺服电动机；2—联轴器；3—双向推力球轴承；4—滚珠丝杠副；5—主轴头；6—绝缘垫

(4) 工作液箱

工作液箱与工作液过滤系统的结构有着紧密联系，在第 2 节进行详细介绍。

需要说明的是，电火花加工过程虽没有机械切削力，但在进行抬刀时，由于抬起的瞬间负压的作用，使主轴头和工作台承受很大的作用力。因此在设计时应考虑强度和刚度，特别是数控机床。另外，数控机床进行机械精度补偿也是极为重要的一环。用激光干涉仪或步距规在 20℃ ± 2℃ 的恒温下对各轴的运动进行检测，得到数控系统机械误差曲线，每间隔 10mm 作为补偿点进行补偿。在以后的机械运行中，机床的运行精度可得到进一步提高。但严格而言，补偿是受温度和补偿点限制的，而且只在相同的温度，相同的点位，这一补偿才是真实的。

(5) 直线电动机结构的电火花成形机床

日本 SODICK 公司率先完成了三轴直线电动机驱动的电火花加工机 AQ 系列的产品化，将电火花加工机床的移动速度提高到 36 m/min，最大加速度达到 1.2g，最小控制当量 0.1 μm，使主轴移动速度提高了 20 多倍，在电加工界引起了很大反响。图 2.5-16 为日本 SODICK 公司生产的 AQ35L 型配有直线电动机的电火花成形加工机床的外形图。

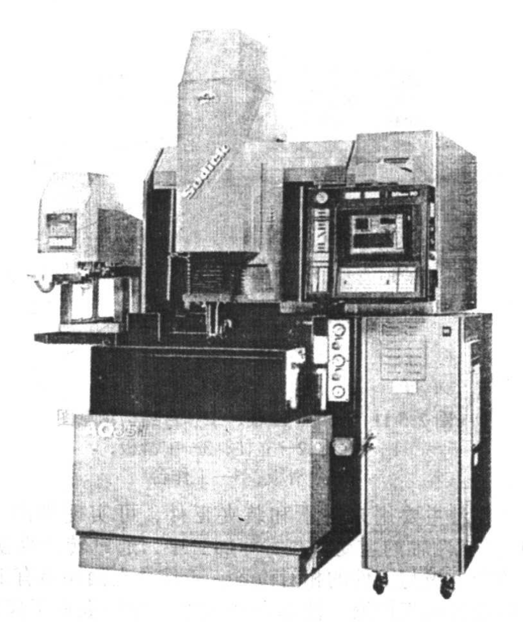


图 2.5-16　AQ35L 型配有直线电动机的电火花成形机床外形

1）直线电动机的结构、动作原理　所谓直线电动机应称作直线同步电动机（LSM），就是把旋转结构的 AC 伺服电动机（见图 2.5-17a）展成如图 2.5-17b 所示的平面直线电动机。图 2.5-18 是直线电动机的结构示意图，图 2.5-19 是直线电动机的剖面图。从图 2.5-18 中可知，它是由直线电动机的陶瓷溜板（主轴）、电枢线圈、永久磁铁构成。另外，还配有平衡汽缸、冷却液管以及直线滚动导轨与检测信号的光栅尺。

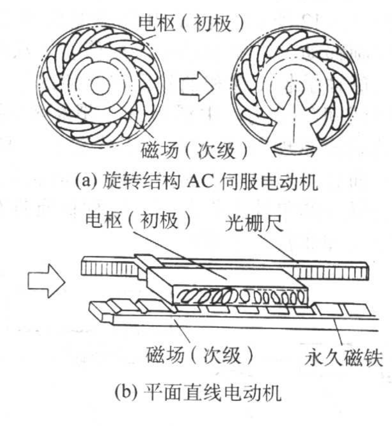


图 2.5-17　旋转和平面直线电动机

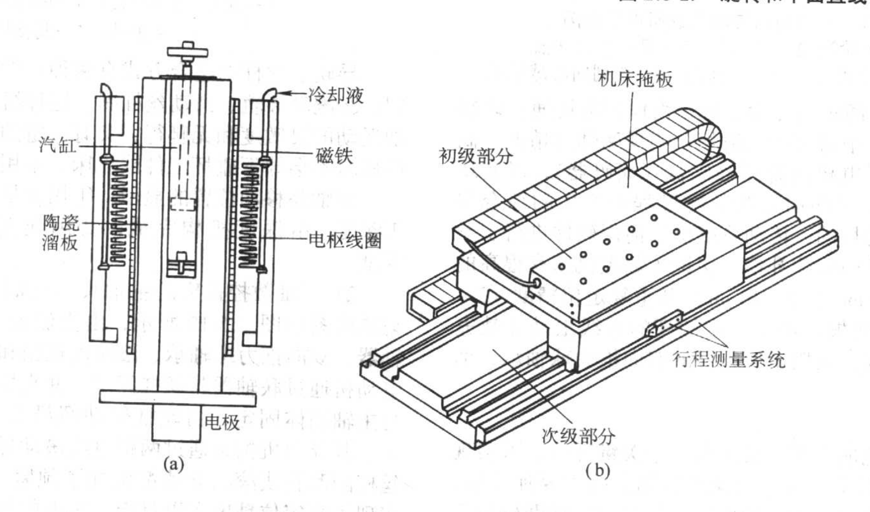


图 2.5-18　直线电动机的结构示意图



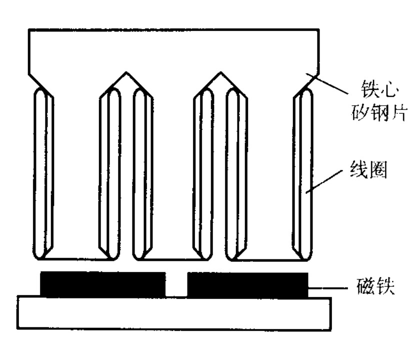


图 2.5-19　直线电动机的剖面图

从原理上讲，直线电动机是由一系列安装在陶瓷主轴上的永久磁铁（动子）与环绕在矽钢片的线圈套筒（定子）组成，当电枢线圈接通脉冲电流时，利用偏移 90°构成的磁场与永久磁铁产生的磁场相互作用产生的电磁推力来推动负载（主轴）上、下移动，推力的大小 则是由电流决定的。

旋转电动机伺服方式是通过编码器的信号来控制位置和速度的，同时，还必须采用滚珠丝杠把旋转运动转换成直线运动。另外，还要通过检测放电间隙的电压来保持一定的加工电压。由于放电间隙极小，只有几微米至几十微米，所以主轴的往复运动很容易受到滚珠丝杠产生的扭曲和齿隙误差的影响。而对直线电动机，由于电动机本身就是一个直接的驱动体，所以光栅尺的信号能直接传递到电动机上，不受丝杠间隙或扭曲的影响，能用更简单的机构进行控制。另外，由于工具电极能直接安装在电动机的主体上，因此可以把两者的动作视为一个整体。即使把放电间隙电压加在反馈系统上也能达到良好的跟踪性，并能实现高速、高响应性以及高稳定的加工。

2）直线电动机的优点

① 速度高　实际应用的最高跳跃（抬刀）速度为 36 m/min，以往最大的跳跃速度为 1.5 m/min。

② 分辨率高　分辨率为 0.1 μm，以往为 0.5～1 μm。

③ 响应速度快　直线电动机的时间常数小于 1 ms，以往电动机的时间常数大约为 0.1 s，电液压伺服系统为 0.05 s，电磁式伺服系统为 0.04 s。

④ 加速度大　最大加速度大于 10g，可达 100 m/s^2，以往的滚珠丝杠为 0.5～1g。

⑤ 效率（能量利用率）高　因为直线电动机没有中间的传动摩擦元件，所以几乎所有的能量都转化成负载的加、减速度。

众所周知，影响电火花加工效率的一个重要因素就是蚀除产物（加工屑、焦油、气体）的排除，由于直线电动机在超高速抬刀时能将介于电极与工件之间的加工屑、焦油以及气体更有效地排出，因此，可以在静止的工作液中加工深的小孔、窄缝，无须借助于喷液冲油就能实现很好的加工效果。

1.1.3　电火花成形加工机床主要精度和技术指标检验

为确保电火花成形加工机床的工作精度，在生产制造出厂检验时、顾客购买验收时、修理后以及顾客使用中怀疑精度有问题或定期检验时，都应进行相应的精度检验或测试其主要技术指标。同时还应根据《中华人民共和国安全生产法》和《中华人民共和国清洁生产促进法》对有关安全和清洁生产进行检查。

（1）电火花成形加工机床检验的主要依据

1）国家标准　①《电火花成形机　精度检验　第 1 部分：单立柱机床（十字工作台型和固定工作台型）》GB/T 5291.1—2001；②《电火花加工机床　安全防护技术要求》GB 13567—1998。

2）行业标准　《电火花成形机　技术条件》JB/T 4105—1999。

3）企业标准　由企业根据生产产品的特点自行制订的标准（该标准应在当地技术监督局备案）。

一般情况下，企业标准严于行业标准，行业标准严于国家标准。当无企业标准时，应执行行业标准或国家标准。

（2）电火花成形加工机床的检验

下面参照国家标准 GB/T 5291.1—2001《电火花成形机　精度检验　第 1 部分：单立柱机床（十字工作台型和固定工作台型）》、GB 13567—1998《电火花加工机床　安全防护技术要求》和行业标准 JB/T 4105—1999《电火花成形机　技术条件》，将有关电火花成形加工机床检验项目及其检验方法进行介绍。

1）电火花成形加工机床精度检验　这里的精度主要指：电火花成形加工机床在非加工状态下的几何精度；数控电火花成形加工机床的数控运动精度，亦称为定位精度；电火花成形加工机床在加工时的一些主要技术指标，亦称工作精度。

① 电火花成形加工机床的几何精度检验

a）一般要求　精度检验需参照国家标准 GB/T 17421.1—1998（eqv ISO 230－1：1996）《机床检验通则　第 1 部分：无负荷或精加工条件下机床的几何精度》和 GB/T 17421.2—2000（eqv ISO 230－2：1997）《机床检验通则　第 2 部分：数控机床轴线的定位精度和重复定位精度的确定》规定的标准测量方法和检验工具的推荐精度来进行。

机床检验前，必须将机床安置在适当的基础上，并按照制造厂的说明书要求调平机床。一般要求≤0.04/1 000。调平的目的是为了得到机床的静态稳定性，以方便其后的测量，特别是与某些部件直线度有关的测量。

注意 1：检验时，除与被检有关的部分外，其余部分应处于最稳定位置并锁紧。

注意 2：若为数控机床，应按照说明书中规定的温度、湿度下进行检验。一般要求温度 22℃ ± 2℃，湿度 40%～80%。

b）定义　全行程——指国家标准 GB/T 5290.1—2001《电火花成形机　参数　第 1 部分：单立柱机床（十字工作台型和固定工作台型）》中的规定值，而不是产品的实际最大位移量。

横向——指与工作台宽度相平行的方向。

纵向——指与工作台长度相平行的方向。

c）机床几何精度检验　表 2.5-3 给出了电火花成形加工机床几何精度检验项目、检验允差值和测量仪器。

表 2.5-3　电火花成形加工机床几何精度检验项目、检验允差值和测量仪器　mm

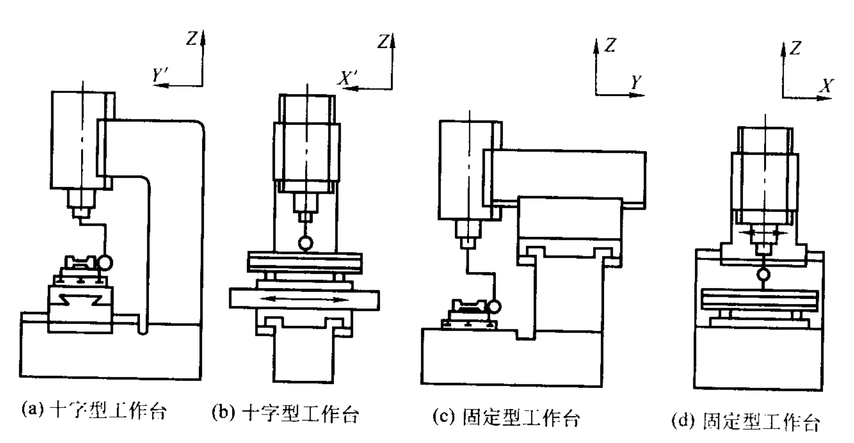
序号	检验项目	检验允差值	测量仪器	备注
G1	X 轴运动直线度的检查：a）在 XY 水平面内；b）在 ZX 垂直面内	对于 a）和 b）在任意 500 测量长度上为 0.015	平尺、千分表和量块	
G2	Y 轴运动直线度的检查：a）在 XY 水平面内；b）在 YZ 垂直面内	对于 a）和 b）在任意 500 测量长度上为 0.015	平尺、千分表和量块	

续表 2.5-3

序号	检验项目	检验允差值	测量仪器	备注
G3	X 轴运动与 Y 轴运动之间的垂直度的检查	在任意 300 测量长度为 0.015	方尺（或平尺、角尺）和千分表	
G4	主轴（Z 轴）垂直运动与 a）X 轴运动；b）Y 轴运动之间的垂直度检查	对于 a）和 b）在任意 300 测量长度上为 0.02	圆柱角尺、平板、调整块和千分表	
G5	主轴头（W 轴）垂直运动与 a）X 轴运动；b）Y 轴运动之间的垂直度的检查	对于 a）和 b）在任意 300 测量长度上为 0.015	圆柱角尺、平板、调整块和千分表	
G6	Z 轴运动中主轴偏摆的检查	在任意 300 测量长度上为 0.04/200	千分表和圆柱角尺	
G7	工作台面平面度的检查	在 1 000 测量长度内为 0.03；每增加 1 000，允差值增加 0.01	精密水平仪和桥板	
G8	工作台面与 a）X 轴运动；b）Y 轴运动之间的平行度的检查	对于 a）和 b）在任意 300 测量长度上为 0.015；最大允差值 0.04	平尺、千分表和量块	
G9	工作台基准 T 形槽或基准面在 X 方向上直线度的检查	在任意 500 测量长度上为 0.02；最大允差值 0.05	平尺、千分表和十字角尺	
G10	工作台基准 T 形槽或基准面与 X 轴运动之间的平行度的检查	在任意 300 测量长度上为 0.015；最大允差值 0.04	千分表	
G11	电极安装板与 a）X 轴运动；b）Y 轴运动之间的平行度的检查	对于 a）和 b）在任意 200 测量长度上为 0.015	千分表	
G12	旋转轴轴线的径向跳动的检查：a）接近旋转轴轴端处；b）距 a）点 100 mm 处	a）0.005 b）0.01	检测棒和千分表	
G13	旋转轴和 Z 轴运动间的平行度的检查：a）在 ZX 平面内；b）在 YZ 平面内	对于 a）和 b）在任意 100 测量长度上为 0.01	检测棒和千分表	
G14	主轴与工作台之间的侧向间隙的检查：a）X 方向；b）Y 方向	a）和 b）最大允值 0.04	千分表和测力计	

以下对电火花成形加工机床的几何精度指标及检验方法逐项进行叙述。

G1. X 轴运动直线度的检查：如图 2.5-20 所示。首先检查 XY 水平面，在工作台面上放一平尺（图 2.5-20a、c），找正平尺与 X 轴平行，固定在主轴上的千分表触头触及平尺的工作表面，在整个测量长度上移动 X 轴并记下读数，误差以千分表读数的最大代数差计。检查 ZX 垂直面，在工作台面上放一平尺，平尺与工作台面间垫两块等高块（图 2.5-20b、d），固定在主轴上的千分表触头触及平尺的工作表面，在整个测量长度上移动 X 轴并记下读数，误差以千分表读数的最大代数差计。



(a) 十字型工作台　(b) 十字型工作台　(c) 固定型工作台　(d) 固定型工作台

图 2.5-20　检验 X 轴运动直线度



检查时，工作台非检验方向的导轨处于中间位置并锁紧。

允差值在任意 500 mm 测量长度上为 0.015 mm。

G2. Y 轴运动直线度的检查：如图 2.5-21 所示。在 XY 水平面、YZ 垂直面内分别检验，检查方法及要求同 G1。允差值在任意 500 mm 测量长度上为 0.015 mm。

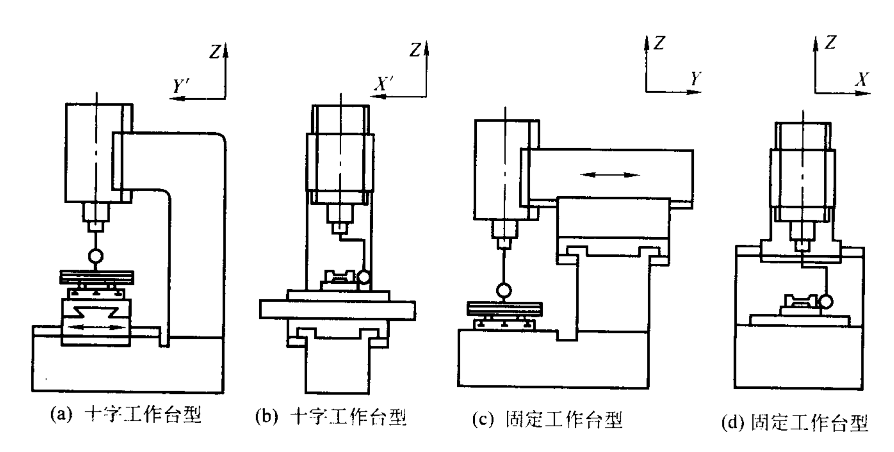


图 2.5-21　检验 Y 轴运动直线度

G3. X 轴运动与 Y 轴运动之间的垂直度的检查：如图 2.5-22 所示。在工作台上调整平尺，使之与 X 轴运动平行，将角尺一面贴靠在平尺上，千分表固定在主轴头上并使触头触及角尺另一面。在整个测量长度上移动 Y 轴并记下读数，误差以千分表读数值的代表差计。

也可以只使用角尺，此时先找正角尺的长边与 X 轴运动平行，检查 Y 轴运动与角尺短边之间的平行度。

允差值在任意 300 mm 测量长度上为 0.015 mm。

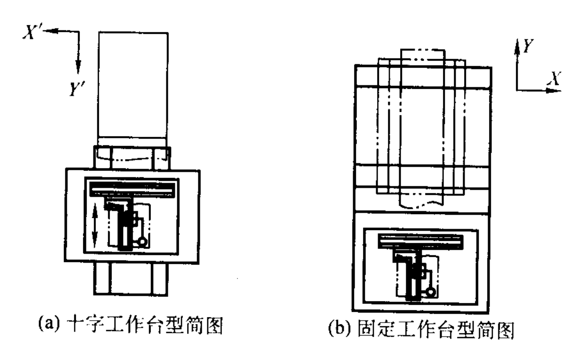


图 2.5-22　X、Y 轴运动垂直度的检验

G4. 主轴（Z 轴）垂直运动与 X 轴运动、Y 轴运动之间的垂直度的检查：如图 2.5-23 所示。工作台位于中间位置并锁紧，平板安置在工作台上，调整平板使其平面与 X 轴和 Y 轴均平行。圆柱角尺安置在平板上，千分表固定在主轴头上。首先使千分表触头沿 X 方向触及圆柱角尺的测量面，沿 Z 方向在整个测量长度上移动主轴并在若干个位置记下读数，误差以读数值中的最大代数差计（图 2.5-23a）。然后在 Y 方向上按同样的方法重复检验（图 2.5-23b）。

允差值在任意 300 mm 测量长度上为 0.02 mm。

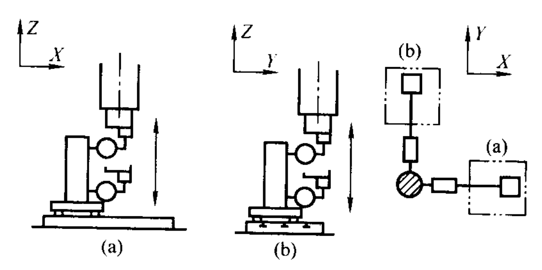


图 2.5-23　Z 轴运动垂直度的检验

G5. 主轴头（W 轴）垂直运动与 X 轴运动、Y 轴运动之间的垂直度的检查：如图 2.5-24 所示。工作台位于中间位置并锁紧，平板安置在工作台上，调整平板使其平面与 X 轴和 Y 轴均平行。圆柱角尺安置在平板上，千分表固定在主轴头上。首先使千分表触头沿 X 方向触及圆柱角尺的测量面上，沿 W 方向在整个测量长度上移动主轴并在若干个位置记下读数，误差以读数值中的最大代数差计。然后在 Y 方向上按同样的方法重复检验。

允差值在任意 300 mm 测量长度上为 0.015 mm。

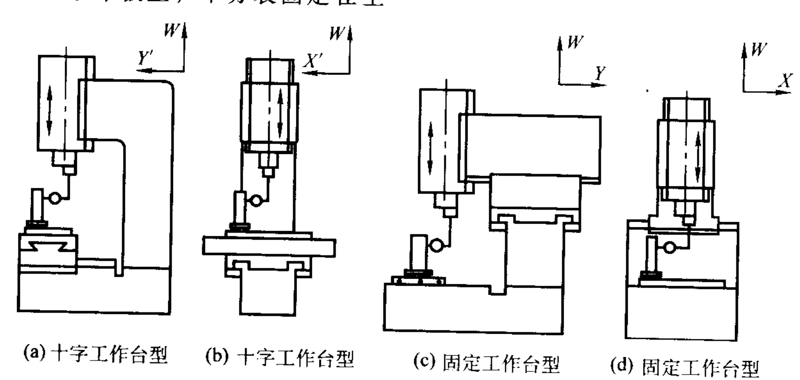


图 2.5-24　检验主轴头运动的垂直度

G6. Z 轴运动中主轴偏摆的检查：如图 2.5-25 所示。工作台位于中间位置并锁紧。圆柱角尺放置在工作台面上，大致与 Y 轴平行。距主轴中心线 100 mm 处的一侧，使装在专用支架上的千分表的触头触及圆柱角尺测量面，在圆柱角尺各相应高度位置记下各个读数。将千分表移到主轴的另一侧，移动 X 轴，使千分表的触头沿同一直线再次触及圆柱角尺测量面上，千分表重新调零，在原先各位置的同样高度上重新测量并记录。计算每个测量高度上两次读数的差值，选择这些差值中的最大值和最小值，由（最大差值 − 最小差值）/200 计算的数值不得超过允差。

允差值在任意 300 mm 测量长度上为 0.04 mm/200 mm。

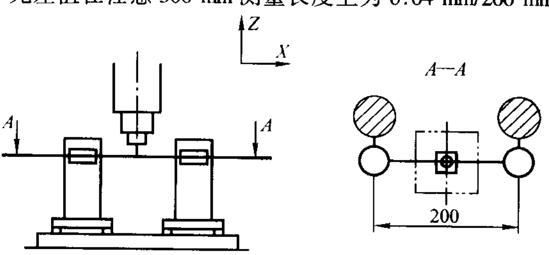


图 2.5-25　检验 Z 轴运动偏摆

G7. 工作台面的平面度的检查：如图 2.5-26 所示。工作台位于行程的中间位置并锁紧。采用水平仪检验，以“三点法”评定平面度误差，水平仪放在桥板上，沿 AB 和 AD 线测定其轮廓，然后沿 A_1B_1、A_2B_2、A_3B_3 和 DC 测定。以通过 A、C、D 三个角点的平面为基准平面，被检面上的各测点到基准平面的坐标值，即为各测点相对于基础平面的偏差。各测点偏差的最大代数差，即为该平面的平面度误差。用水平仪和桥板按网格布点检验矩形平面的平面度时，其误差计算方法见实例。

某矩形工作台尺寸为：$B \times L = 950\ \text{mm} \times 1\ 200\ \text{mm}$，测量工作台的平面度误差。采用 0.02/1 000 的水平仪及桥板（跨距横向 200 mm、纵向 250 mm）按网格布点进行测量，如图 2.5-26 所示。从 A 点（零点）开始，按图中的箭头方向，采用两点连锁法进行测量，所测得的水平仪读数（格数）见表 2.5-4。

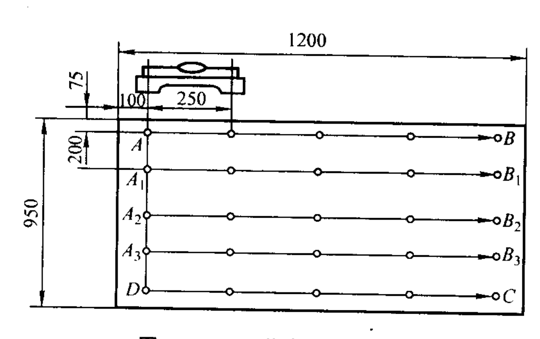


图 2.5-26　工作台面网格布点

表 2.5-4　各测点的水平仪读数　格

	0	1	2	3	4	
A	0	−0.5	−0.5	+1.5	+1.5	B
A_1	−1.0	−1.0	−1.0	+2.5	+2.0	B_1
A_2	−1.5	−0.5	0	+2.0	+1.5	B_2
A_3	+2.5	−1.5	−0.5	+1.5	+2.5	B_3
A_4	+2.0	−2.0	−0.5	+1.0	+2.0	C

为了便于作图，应首先求出各测点相对于通过 A 点（零点）的水平面的高度差，即按测量方向，将各测点的水平仪读数叠加，亦即从 0 点开始，将各段所测得的读数累计相加。如 AB 线的第 1 段读数为 −0.5 格，第 2 段为 −0.5 格，第 3 段为 +1.5 格，第 4 段为 +1.5 格。因此叠加后成为：0、−0.5、−1.0、+0.5、+2.0（格）。AD 线的叠加方法与 AB 线相同，但在 A_1B_1 线叠加时，要把起点 A_1 的读数加到 A_1B_1 线各段的读数中去。如 A_1 点为 −1.0（格）转换成线值为 −4.0 μm，这样将 A_1B_1 线各段的读数转换在线值后，在各段都要加上 −4.0 μm。水平仪每格的线值（mm）如下。

纵向：$0.02/1\ 000 \times 250 = 0.005$ mm；横向：$0.02/1\ 000 \times 200 = 0.004$ mm。

各测点相对于通过 A 点（0 点）的水平面的高度差见表 2.5-5。

表 2.5-5　各测点水平面的高度差　μm

	0	1	2	3	4	
A	0	−2.5	−5.0	+2.5	+10.0	B
A_1	0.4	−9.0	−14.0	−1.5	+8.5	B_1
A_2	−10.0	−12.5	−12.5	−2.5	+5.0	B_2
A_3	0	−7.5	−10.0	−2.5	+10.0	B_3
D	+8.0	−2.0	−4.5	+0.5	+10.5	C

用计算法求平面度误差，只需将表中所列的各测点相对于通过 A 点（零点）的水平面的高度差作进一步处理，即可获得各点相对于基准平面的偏差。

从表 2.5-5 中可以看出，B 点相对于通过 A 点的水平面的高度差为 +10 μm，D 点为 +8.0 μm。为了使 B、D 两点均为 0，在 B 点应减 10.0 μm，在 D 点应减 8.0 μm，同时其余各点也要作相应的修正。就是说，要使通过 A 点的水平面以 A 点为支点转一角度，使之成为通过 A、B、D 三点的基准平面。

在横向 AD 线，共分四段，设每一段为一个 Y，如在 D 点减 8.0 μm，则 $4Y = -8.0$ μm，$Y = -2.0$ μm，即 A_3 点应减 6.0 μm，A_2 点应减 4.0 μm，A_1 点应减 2.0 μm。AB 线与 AD 线的计算方法相同。但在 A_1B_1、A_2B_2、A_3B_3 及 DC 误差曲线上的各测点，应按其所处的坐标位置将纵向及横向的修正值相加，即为各点的修正值。各测点修正后的偏差值见表 2.5-6。

表 2.5-6　各测点修正后的偏差值　μm

		0	1	2	3	4	
			$X=-2.5$	$X=-5.0$	$X=-7.5$	$X=-10.0$	X
A		0	−5.0	−10.0	−5.0	0	B
A_1	$Y=-2.0$	−6.0	−13.5	−21.0	−11.0	−3.5	B_1
A_2	$2Y=-4.0$	−14.0	−19.0	−21.5	−14.0	−9.0	B_2
A_3	$3Y=-6.0$	−6.0	−16.0	−21.0	−16.0	−6.0	B_3
D	$4Y=-8.0$	0	−12.5	−17.5	−15.0	−7.5	C
		Y					

从表 2.5-6 可以看出，最高点的偏差为 0，最低点的偏差为 −21.5 μm。因此，该工作台的平面度误差：$\delta = 0 - (-21.5)\ \mu\text{m} = 21.5\ \mu\text{m} = 0.021\ 5$ mm，满足公差要求。

允差值在 1 000 mm 测量长度内为 0.03 mm，长度每增加 1 000 mm，允差值增加 0.01 mm。

G8. 工作台面与 X 轴运动、Y 轴运动之间的平行度的检



查：如图2.5-27所示。工作台上放一平尺，平尺与工作台面间垫两块等高块。固定在主轴头上的千分表触头触及平尺的上表面，在整个测量长度上移动 X 轴并记下读数，误差以千分表读数的最大代数差计。沿 Y 方向按同样方法重复检查。也可不用平尺而直接对工作台面测量。

检验时，工作台非检验方向的导轨处于中间位置并锁紧。

允差值对于 X 轴、Y 轴在任意300 mm测量长度上为0.015 mm，最大允差值为0.04 mm。

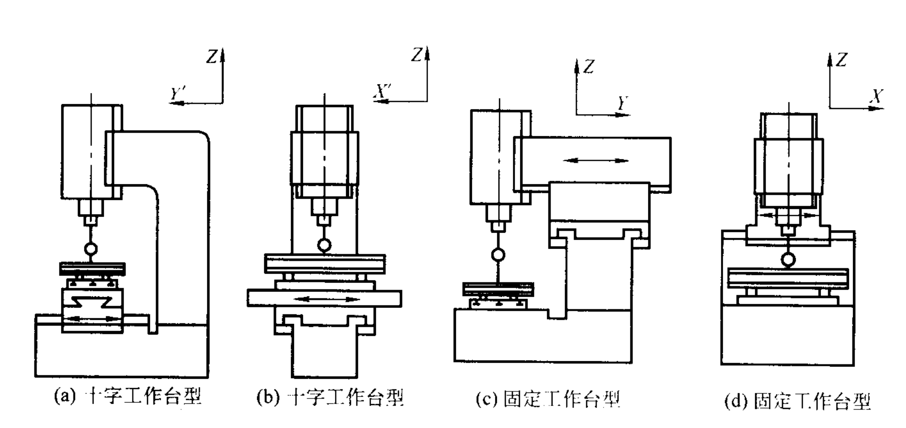


图2.5-27　检验工作台平行度

G9. 工作台基准T形槽或基准面在 X 方向上的直线度的检查：如图2.5-28所示。平尺放在工作台面上，调整平尺使之与基准槽或工准面平行。千分表座固定在十字角尺上，使其触头触及平尺工作面，在 X 方向沿基准槽或基准面移动十字角尺并记下读数，误差以最大读数的代数差计。

允差值在任意500 mm测量长度上为0.02 mm，最大允差值为0.05 mm。

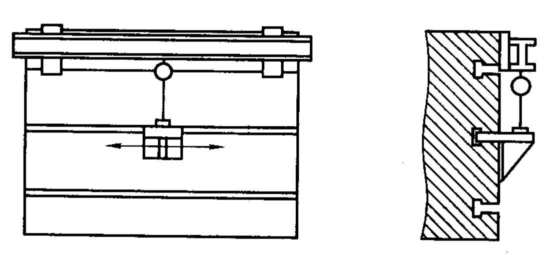


图2.5-28　检验工作台基准直线度

G10. 工作台基准T形槽或基准面与 X 轴运动之间的平行度的检查：如图2.5-29所示。千分表固定在主轴头上，使其触头触及基准槽或基准面，在整个测量长度上移动 X 轴并记下读数，误差以最大读数的代数差计。

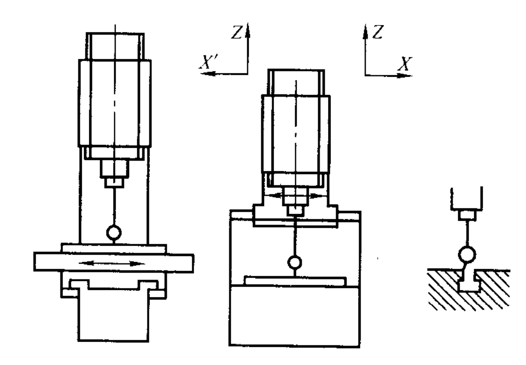


图2.5-29　检验工作台基准与 X 轴运动的平行度

允差值在任意300 mm测量长度上为0.015 mm，最大允差值为0.04 mm。

G11. 电极安装板与 X 轴运动、Y 轴运动之间的平行度的检查：如图2.5-30所示。千分表固定在工作台上，使其触头触及电极安装板的端面，以电极安装板的长和宽为测量长度，移动 X 轴并取若干个位置记下读数，误差以千分表读数值的最大代数差值计。移动 Y 轴按同样方法重复检查。

允差值对于 X 轴、Y 轴在任意200 mm测量长度上为0.015 mm。

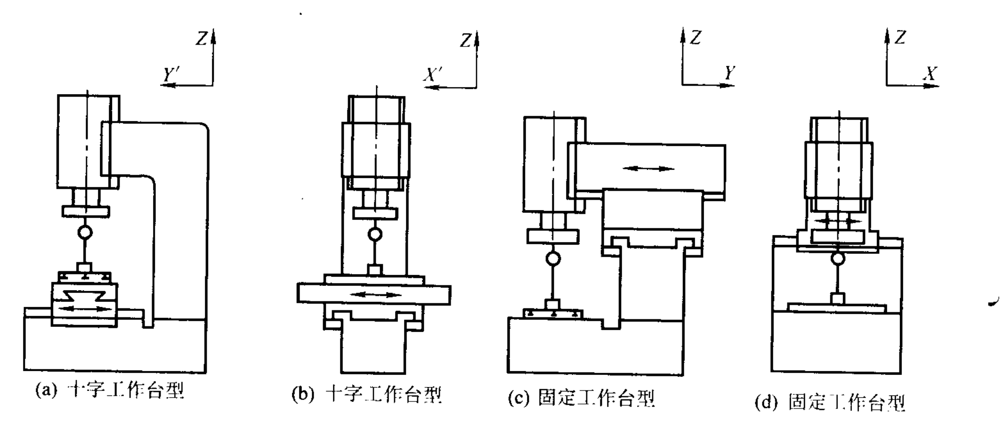


图2.5-30　检验电极安装板与 X、Y 轴平行度

G12. 旋转轴轴线的径向跳动的检查：如图 2.5-31 所示。工作台位于中间位置并锁紧，检测棒固定在旋转轴上，千分表固定在工作台面上，先在接近旋转轴的轴端处（此点为 *a*），使千分表触头触及检测棒的测量面。转动旋转轴并记下读数，再在距 *a* 点 100 mm 处（此点为 *b*）按同样方法重复检查。*a* 点和 *b* 点处的误差以千分表读数值的最大值计。

允差值 *a* 点为 0.005 mm，*b* 点为 0.01 mm。

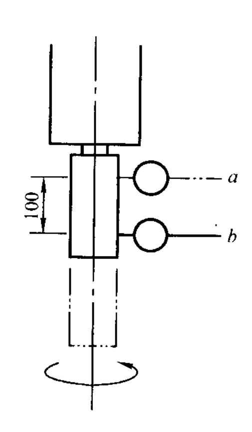


图 2.5-31 检验旋转轴径向跳动

G13. 旋转轴和 *Z* 轴运动间的平行度的检查：如图 2.5-32 所示。工作台位于中间位置并锁紧，检测棒固定在旋转轴上，千分表固定在工作台面上，首先在 *ZX* 平面内，使千分表触头触及检测棒的测量面。转动旋转轴找到其中间位置，沿 *Z* 方向移动主轴并在若干个位置记下读数，读数的最大差值不得超过允差。在 *YZ* 平面内按同样方法重复检查。

允差值对于 *ZX* 平面、*YZ* 平面在任意 100 mm 测量长度上为 0.015 mm。

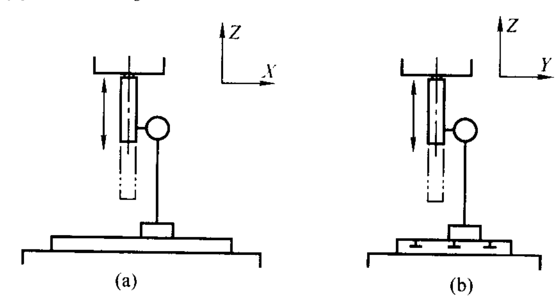
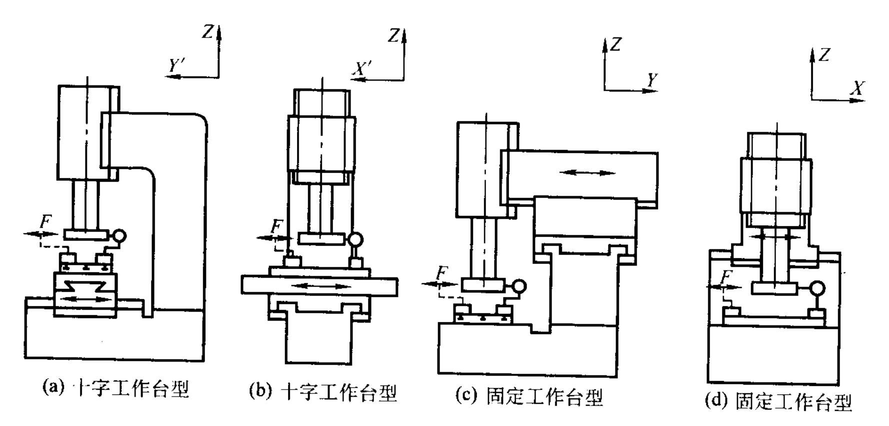


图 2.5-32 检验旋转轴和 Z 轴的平行度

G14. 主轴与工作台之间的侧向间隙的检查：如图 2.5-33 所示。工作台位于中间位置并锁紧。主轴伸出至最大位置，千分表固定在工作台上，使千分表触头沿 *X* 方向触及电极安装板的侧面，由千分表相对的一面向电极安装板施加力 *F* 并记下读数，再由千分表所在的一面施加同样的力并记下读数，取上述读数的差值作为测量值。在 *Y* 方向上按同样方法重复检查。*F* 为允许最大电极重量的 1/10，且不超过 100 N，*F* 应由供应商说明。

允差值对于 *X* 方向、*Y* 方向为 0.04 mm。

② 电火花成形加工机床的定位精度检验　表 2.5-7 给出了电火花成形加工机床定位精度检验项目、检验允差值和测量仪器。



(a) 十字工作台型　(b) 十字工作台型　(c) 固定工作台型　(d) 固定工作台型

图 2.5-33 检验工作台侧向间隙

表 2.5-7 电火花成形加工机床定位精度检验项目、检验允差值和测量仪器

mm

序号	检验项目	检验允差值					测量仪器
P1	轴进给机构的间隙的检查：a) *X* 轴内；b) *Y* 轴内；c) *Z* 轴内	对于 a)、b) 和 c)，0.03					千分表和量块
P2	*X* 轴运动的定位精度、重复定位精度和定位反向差值（失动量）的检查	允差		测量长度			长度基准尺和显微镜或激光测量仪器
				≤500	≤1 000	≤2 000	
		双向定位精度	*A*	0.011	0.015	0.019	
		单向重复定位精度	*R*↑ 和 *R*↓	0.005	0.007	0.009	
		双向重复定位精度	*R*	0.009	0.012	0.015	
		轴的反向差值（失动量）	*B*	0.008	0.010	0.013	
		平均反向差值（失动量）	$\overline{B}$	0.004	0.005	0.006	
		双向定位系统偏差	*E*	0.006	0.007	0.008	
		轴的双向平均定位偏差范围	*M*	0.002	0.003	0.004	

续表 2.5-7

序号	检验项目	检验允差值					测量仪器
P3	*Y* 轴运动的定位精度、重复定位精度和定位反向差值（失动量）的检查	允差		测量长度			长度基准尺和显微镜或激光测量仪器
				≤500	≤1 000	≤2 000	
		双向定位精度	*A*	0.011	0.015	0.019	
		单向重复定位精度	*R*↑和 *R*↓	0.005	0.007	0.009	
		双向重复定位精度	*R*	0.009	0.012	0.015	
		轴的反向差值（失动量）	*B*	0.008	0.010	0.013	
		平均反向差值（失动量）	$\overline{B}$	0.004	0.005	0.006	
		双向定位系统偏差	*E*	0.006	0.007	0.008	
		轴的双向平均定位偏差范围	*M*	0.002	0.003	0.004	
P4	*Z* 轴运动的定位精度、重复定位精度和定位反向差值（失动量）的检查	允差		测量长度			长度基准尺和显微镜或激光测量仪器
				≤250	≤500	≤1 000	
		双向定位精度	*A*	0.009	0.011	0.015	
		单向重复定位精度	*R*↑和 *R*↓	0.004	0.005	0.007	
		双向重复定位精度	*R*	0.007	0.009	0.012	
		轴的反向差值（失动量）	*B*	0.006	0.008	0.010	
		平均反向差值（失动量）	$\overline{B}$	0.003	0.004	0.005	
		双向定位系统偏差	*E*	0.005	0.006	0.008	
		轴的双向平均定位偏差范围	*M*	0.002	0.002	0.003	
P5	*C* 轴运动的定位精度、重复定位精度和定位反向差值（失动量）的检查	允差/角度秒					千分表或平尺，或带分度盘的激光角度干涉仪
		双向定位精度	*A*	80			
		单向重复定位精度	*R*↑和 *R*↓	40			
		双向重复定位精度	*R*	55			
		轴的反向差值（失动量）	*B*	40			
		平均反向差值（失动量）	$\overline{B}$	20			
		双向定位系统偏差	*E*	40			
		轴的双向平均定位偏差的范围	*M*	25			

以下对电火花成形加工机床定位精度指标及其检验方法逐项进行叙述。

P1. 轴进给机构的间隙的检查：用于普通型、单轴数控型机床。检测示意如图 2.5-34 所示。千分表固定在主轴末端或电极安装板上，量块放在工作台面上，使得通过工作台（见图 2.5-34a）沿 *X* 方向进给移动时千分表的触头能触及量块。

沿 *X* 轴（见图 2.5-34a）向正（或负）方向低速进给移动工作台直到触头触及量块，以此停止位置作为基准，记下千分表读数及手轮的位置。转动手柄继续向同一方向进给一点（例如 2 mm），然后退回到手柄初始位置，记下千分表读数并与第一次记录的数值比较取读数差值。在手柄同一位置重复检查 5 次，取读数差值的平均值作为该位置的间隙。检查轴的两端及中间处共三个位置的间隙，取最大值作为该轴的间隙。

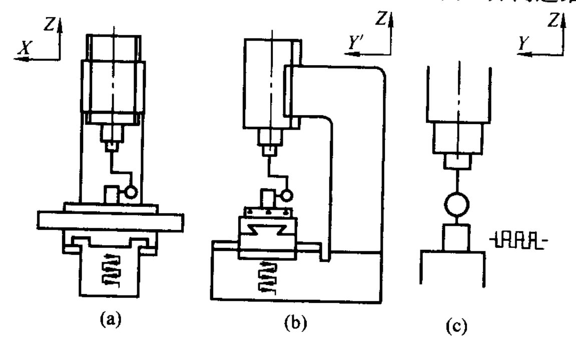


图 2.5-34　检验各轴进给机构的间隙

沿 *Y* 轴（见图 2.5-34b）和沿 *Z* 轴（见图 2.5-34c）按同样的方法重复检查。

由于丝杆与螺母之间一般都有间隙，所以在正走后反向移动时会少走一小段距离，这个距离主要反映了工作台正、反向时传动丝杆与丝母之间的间隙带来的误差。

允差值内对于 *X* 轴内、*Y* 轴内、*Z* 轴内均为 0.03 mm。

P2. *X* 轴运动的定位精度、重复定位精度和定位反向差值的检查：用于三轴数控型机床。检测示意如图 2.5-35 所示。一般采用激光测量仪器和相应的测试软件进行检测。测试前应将被检机床、测量仪器放置在恒温室一段时间使其各部分等温，并让机床各轴空运行 3 h 后才能开始检测。测试时注意使光束轴线与被检 *X* 轴平行，两端测试点应让出极限移动位置，移动速度应采用低速。各项允差值见表 2.5-7 中 P2。

P3. *Y* 轴运动的定位精度、重复定位精度和定位反向差值的检查：用于三轴数控型机床。检测示意如图 2.5-36 所示。检测方法同 P2。各项允差值见表 2.5-7 中 P3。

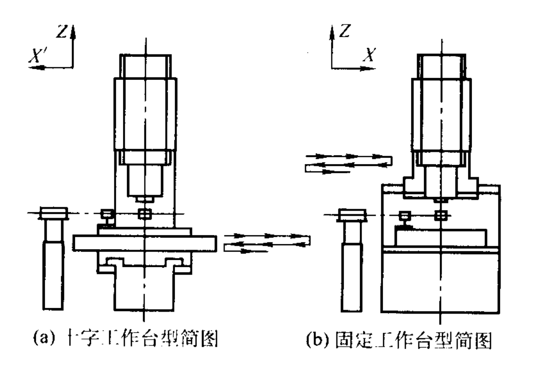


图 2.5-35 检验 X 轴的定位精度、重复定位精度和反向差值

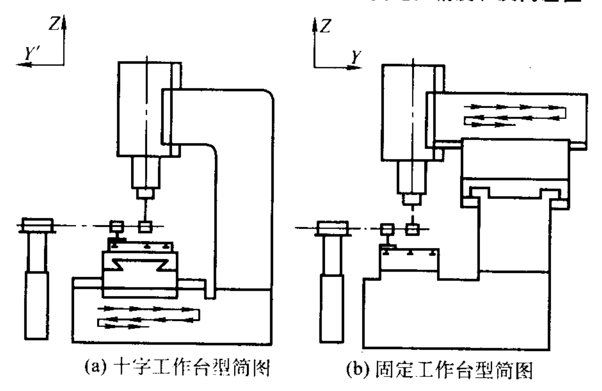


图 2.5-36 检验 Y 轴的定位精度、重复定位精度和反向差值

P4．*Z* 轴运动的定位精度、重复定位精度和定位反向差值的检查：用于三轴数控机床，检测示意如图 2.5-37 所示。检测方法同 P2。各项允差值见表 2.5-7 中 P4。

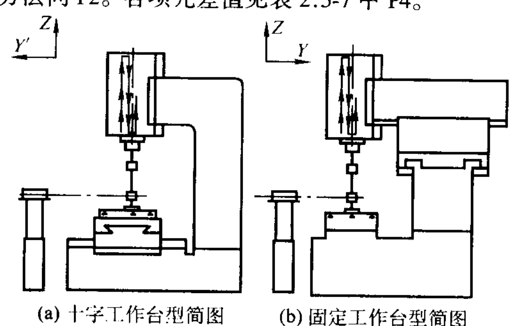


图 2.5-37 检验 Z 轴的定位精度、重复定值精度和反向差值

P5．*C* 轴运动的定位精度、重复定位精度和定位反向差值的检查：用于三轴数控机床，检测示意如图 2.5-38 所示。一般采用带分度盘的激光角度干涉仪和相应的测试软件进行检测。测试前应将被检机床、测量仪器放置在恒温室一段时间使其各部分等温，并让 *C* 轴空运行 3 h 后才能开始检测。测试时至少测量 4 个目标位置（如 0°、90°、180°、270°），移动速度应采用低速。各项允差值见表 2.5-7 中 P5。

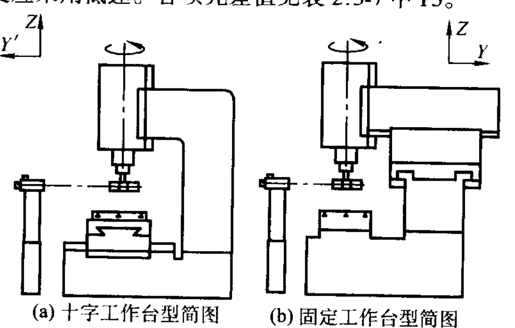


图 2.5-38 *C* 轴的定位精度、重复定位精度和反向差值

③ 电火花成形加工机床的工作精度（加工技术指标考核） 表 2.5-8 给出了电火花成形加工机床工作精度检验项目、检验允差值和测量仪器。

表 2.5-8 电火花成形加工机床工作精度检验项目、检验允差值和测量仪器 mm

序号	检验项目	检验允差值	测量仪器	备注
M_1	精加工孔的间距精度和直径差的检查 a）间距精度；b）*X* 方向和 *Y* 方向测量的直径差	a）间距精度 对于 90 和 120：0.02 对于对角线（150）：0.03 b）*X* 方向和 *Y* 方向测量的直径差：0.02	坐标测量仪	

下面对电火花成形加工机床工作精度指标及其检验方法进行叙述。

M_1：精加工孔的间距精度和直径差的检查。

检查前的准备：

* 工件：材料选用 45 调质钢，预加工尺寸和要求如图 2.5-39 所示。

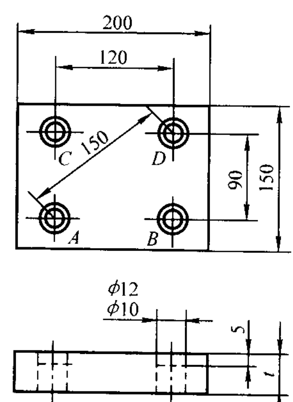


图 2.5-39 检验电火花加工机床工作精度的样件

* 电极：材料选用纯铜。
* 加工要求：加工孔径 $\phi10\sim12$ mm，孔间距 120 ~ 90 mm，加工深度 ≥5 mm。
* 加工条件：最后一挡的精加工规准应满足加工后的表面粗糙度 $R_a \leqslant 2$ μm。
* 加工方法：将工件安装在工作台上，并使其基准面与工作台的运动方向平行，平行误差 ≤0.01/120 mm。将电极安装在主轴头下面的夹具上，并对其进行 *XY* 平面的垂直度找正，垂直度误差 ≤0.01/20 mm。以工件上的 *A* 点为原点，用增量坐标法确定 *B*、*C* 及 *D* 点的位置，用相同的加工规准和同一根工具电极加工各孔。

检查方法：加工后可用三坐标测量机测量各孔沿 *X*、*Y* 坐标轴方向的中心距离，记录 X_1、X_2、Y_1 及 Y_2 值，并分别与设定值相比，以差值中的最大值为间距精度的误差值。用勾股定理计算 *A*、*D* 两孔的中心距离和 *B*、*C* 两孔的中心距离，并分别与设定值相比，以差值中的最大值为对角线间距精度的误差值。分别测量 *A*、*B*、*C* 及 *D* 四孔 *X*、*Y* 方向上的孔径值，并与设定值相比，取 *X*、*Y* 中最大值为直径差的误差值。

间距精度允差值：对于 120 mm，X_1 及 X_2 之差 ≤0.02 mm；对于 90 mm，Y_1 及 Y_2 之差 ≤0.02 mm；对于对角线 150 mm，X_1Y_1 的计算值及 X_2Y_2 的计算值之差 ≤0.03 mm。*X* 方向和 *Y* 方向测量的直径差允差值：0.02 mm。

2）电火花成形加工机床的安全和对环境影响检查 详见第 9 章电火花加工中的防火技术保安及无害化。

1.2　电火花成形加工机床用附件

附件（夹具）用于完成装夹工具电极和工件及特殊要求的运动。一般分为机床通用附件和用于工件特殊加工用途的专用附件。

1.2.1　电火花成形加工机床通用附件

《电火花成形机　技术条件》(JB/T 4105—1999) 对电火花成形加工机床应提供的随机附件提出明确要求：①电极夹具一套；②垫块一套；③压板一套；④紧固工件用螺栓一套；⑤冲液附件一套。

(1) 万向可调电极夹具

万向可调电极夹具是最基本的夹具，安装在主轴头下面，用于装夹工具电极并对其进行调整。工具电极装夹在夹具上，在加工前需进行与工件基准面 X、Y 平面垂直度调节，在加工型孔或型腔时，还需在水平面内进行角度的旋转调节，使工具电极的截面形状与加工出工件型孔或型腔预定的位置一致。下面介绍几种常用的夹具结构及工作原理。

结构之一：上下两块圆盘，中间一颗钢球，四周 90°分布四个调节螺钉（如图 2.5-40），通过调节四个螺钉来调整垂直度。这种结构由于调节中下盘需偏摆，一般需要在螺钉头下加上球面垫圈。调整时，首先调节 X 方向的螺钉，然后再调节 Y 方向的螺钉。这种结构当 X 方向垂直度调好后，调 Y 方向时，X 方向的两调节螺钉就必须在 Y 方向上来个倾斜，就会影响原来已调好的 X 方向垂直度，这种互相牵制的结果就要求来回调整几次，以确保电极两方向正确位置。由于两对螺钉都处于不稳定的满拧状态，螺钉始终处于两组弯矩的作用下工作，故只能用扳手拧调节螺钉，操作麻烦。上述结构简单，调整范围较大。

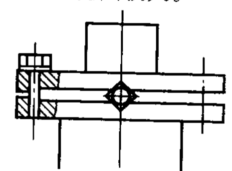


图 2.5-40　夹具结构（一）

结构之二：也是上下两个盘，但中间是个球面螺钉连接，由两对球头滚花紧定螺钉调节（如图 2.5-41），在设计上保证顶丝的接触点和球面螺钉的球心在一条直线上。这样在做第二方向调节时，就提供了一个很好的回转轴，两个方向上的调节互不影响，并且为了调节方便，在左、后两个方向上加两个复位弹簧。这样在校正电极垂直度时，可先放松操作不太方便的后面和左螺钉，仅需调节前面和右面的螺钉和弹簧。做来回调节，如调节合适，才将后面和左面螺钉锁紧固定。

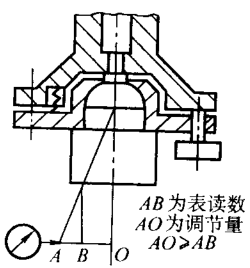


图 2.5-41　夹具结构（二）

结构之三：为了操作方便，把垂直调节的螺钉改成水平方向，中间通过顶一个钢球转换调节方向（如图 2.5-42）。这种校正夹具调节方便，但不足之处是调整角度时回转轴心在夹具体内，若打表读数上下两点差 0.2 mm；在按表读数校正时，调整值往往要比 0.2 mm 大一倍以上，就是有经验的操作者也要调整几次才能校正。

电极夹具的旋转方向调整常用一对滚动轴承，内外圈紧配，并用背面消除轴承间隙，但由于高度限制两轴承紧靠，以减少空间尺寸。

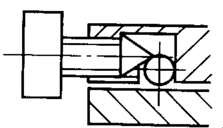


图 2.5-42　夹具结构（三）

电极夹具装夹电极柄的部分一般是一个 V 形靠座，固定电极柄端部的尺寸和形状有圆柱形、四方柱形或异形。如果 V 形靠座和电极柄的尺寸精度制作较高，就可成为最简单的快换夹具。

图 2.5-43 是北京迪蒙斯巴克工控技术有限公司生产的带垂直和水平转角调节装置的电极夹具结构示意图。

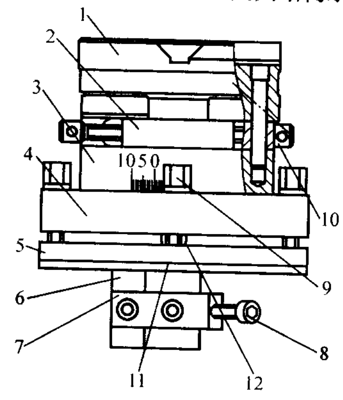


图 2.5-43　带垂直和水平转角调节装置的电极夹具
1—夹具体；2—调整环；3—支撑套；4—圆盘；5—固定座；6—V 形靠座；7—夹座；8—紧固螺钉；9—垂直调整螺钉；10—转角调整螺钉；11—绝缘板；12—钢珠

其调整方法：在夹具体前方左右各有一转角调整螺钉，可调整电极转角 ± 10°。夹具体上左右、前后设有四个螺钉，利用这四个螺钉可调整电极与工作台的垂直 。夹具体下方是 V 形靠座，其上有两相互垂直的靠面，可将电极柄定位于靠面上，用紧固螺钉将电极柄压紧，吊住电极。

在结构设计中应注意工具电极的夹持调节部分要单独绝缘，以防止操作人员触电。见图 2.5-43 的绝缘板。

(2) 冲液附件

1) 油杯　如图 2.5-44 所示，在电火花加工中，油杯是实现工作液冲油或抽油强迫循环的一个主要附件，其侧壁和底边上开有冲油和抽油孔。在放电电极间隙冲油或抽油，可使电蚀产物及时排出，因此油杯的结构好坏，对加工效果有很大影响。放电加工时，工作液会分解产生气体（主要是氢气），这种气体如不及时排出，就会存积在油杯里，当被电火花放电引燃时，将产生放炮现象，造成电极与工件位移，给加工带来很大麻烦，影响被加工工件的尺寸精度，所以对油杯的应用要注意以下几点。

① 油杯要有合适的高度，能满足加工较厚工件的电极伸出长度，在结构上应满足加工型孔的形状和尺寸要求。油杯的形状一般有圆形和长方形两种，而且都应具备冲、抽油的条件，但不能在顶部积聚气泡。为此，抽油抽气管应紧挨在工件底面（见图 2.5-44）。

② 油杯的刚度和精度要好，根据加工的实际需要，油杯的安装平面与基准端面平面度不应超过 0.01 mm，同时密封性要好，防止有漏油的现象。

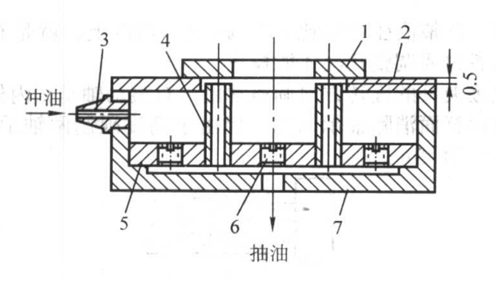


图 2.5-44　一种油杯结构图

1—工件；2—油杯盖；3—管接头；4—抽油抽气管；5—底板；6—油塞；7—油杯体

③ 图 2.5-44 中油杯底部的抽油孔，如底部安装不方便，也可安置在靠底部侧面，也可省去抽油抽气管和底板，而直接安置在油杯侧面的最上部。

由于存在着“放炮”现象，《电火花加工机床　安全防护技术要求》GB 13567—1998 对油杯附件的安全设计提出明确要求：电火花成形机在采用油杯附件加工时，应采取预留排气孔等防爆措施，以防止加工时由于工件与工具电极的加工间隙中积存大量气体而发生爆炸和产生抛射危险。

2）可移动冲液附件　图 2.5-45 是可移动冲液附件的外形图。在加工中，当工具电极和工件都不能加工冲液孔而又需要进行冲液时，就将该附件放在需要的位置用磁铁固定进行侧向冲液。此附件结构小巧，使用方便。

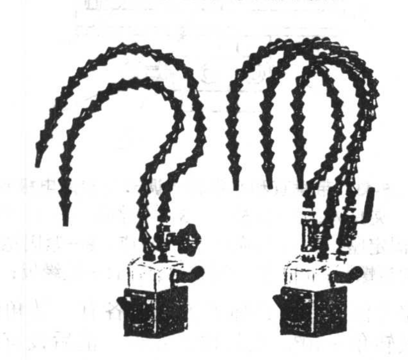


图 2.5-45　可移动冲液附件的外形图

（3）垫块、压板、紧固用螺栓和螺母等

垫块是固定工件用的，有可调垫块、阶梯垫块、固定等高垫块。它与压板、螺栓和螺母等都是夹紧固定工件用的。

1.2.2　电火花成形加工机床专用附件

电火花成形加工机床专用附件一般有：①快速可换夹具；②平动头；③自动灭火器；④U 轴和 R 高速旋转轴；⑤磁力吸盘。

（1）快速可换夹具

当前国内模具行业中电火花加工的主力机种还是普通的电火花成形机。其上一般只有简单的电极校正夹头，由操作者找正电极相对工件的垂直度和电极在加工平面内图形的取向，随后以模具的基准面为准将电极移动到要求的加工位置。通常有规则外形的电极，这些操作算不上困难，但颇费时间。若电极外形比较复杂，非圆非方，又不对称或尺寸较小，比较单薄，就要做工装，将此类电极镶进一定位板里，有时亦可以镶进去几个电极，以保证相互间的位置精度。这样电极位置基准就转移到定位板上，操作者仅需按定位板找正相对工件的位置即可。但这样使电极制造工作量加了一倍，并带来了新的误差。现在的模具型腔绝大多数为一模多腔，型腔的精度、复杂程度和表面粗糙度比以往有很大的提高。用粗精二种电极或采用形状分解成一腔多电极非常普遍，例如录音带盒注塑模一模四腔要用 139 个电极。如果用普通的电极校正夹头，要做若干电极定位板，工时消耗过大，而且常用电极材料是硬度很低的纯铜和石墨。一般的石墨比较脆，强度也低，很难在紫铜和石墨上加工出有一定精度的基准面。如果形状复杂或尺寸小的电极，就没有足够的刚性，承受必要的夹紧力。故此时必须在电极加工前固定上一个附加基准，成为随行夹具，只要保证夹具和电极之间连接可靠，这种随行夹具在电极的车、铣、线切割到最后在电火花机床上使用时都以它为定位基准。

随行夹具由于采用了统一基准的原理，故有充分的可控性，即装拆中无需调整就可以保证一定的位置精度，从而大大减少了调整所需辅助时间，一般称之为快速可换夹具。

按快换夹具的发展来看，早在 20 世纪 70 年代就出现了第一代夏米尔公司的电磁夹头，这是完全按夹具六点定位原理设计的：由电磁吸盘提供的一个电极安装面包含三点，一个侧挡板为两点，再加上一个挡销成第六点（如图 2.5-46）。

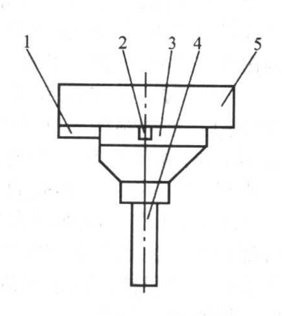


图 2.5-46　电磁夹头

1—挡块；2—挡销；3—接头；4—电极；5—电磁吸盘

第二代夹头是圆柱柄液压薄膜夹头（如图 2.5-47）、圆柱柄带斜面夹头（如图 2.5-48）及 7:24 锥柄夹头（如图 2.5-49），此类夹具以对中心为主。第三代夹具——十字双 V 形夹头（如图 2.5-50）。一个 V 形夹头为四点定位，二个 V 形夹头就是过定位，即定位不实。但在一定加工精度保证下，由于各定位面之间的相互补偿使定位更准。这与多齿转台的高精度定位原理有相似之处，它的特点是高刚度和角度定位准。上述三代夹具都因加工精度要求高，用户难以接受其价格，此外卡头的定位贴合面比较大，清洁成问题，稍有灰尘就会定位不准，甚至拉伤高精度的定位面。例如液压薄膜夹头，为了保证薄膜套的弹性，套硬度在 40 ~ 50HRC 之间，如保护不善是容易拉毛损坏的。

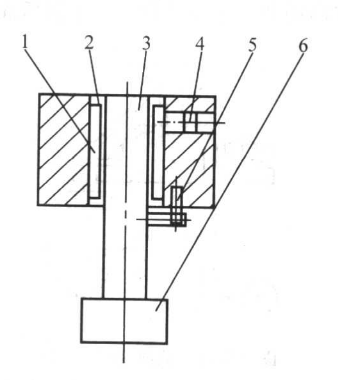


图 2.5-47　圆柱柄液压薄膜夹头

1—液压油；2—弹性胀套；3—接把；4—活塞；5—挡销；6—电极



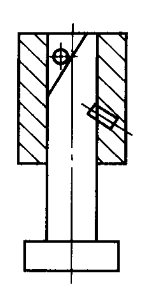


图 2.5-48 圆柱柄带斜面夹头

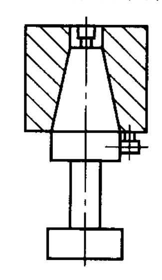


图 2.5-49 锥柄夹头

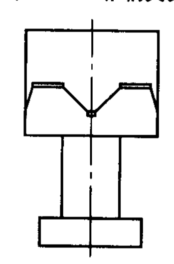
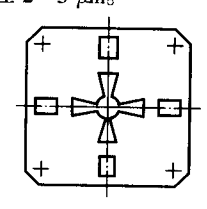


图 2.5-50 十字双 V 形夹头

第四代夹具例如 EROWA 夹头，它以弹簧片成十字分布的四个方孔与卡盘上的斜楔啮合作为取向和对中，再加上四点平面支撑，同样是采取过定位误差补偿原理，实现电极的精密定位（如图 2.5-51）。还有 MECATOOL 的夹具系统，它由卡盘上的两对十字分布的斜榫槽在轴向的拉紧力下，使铝压铸的夹头相应部位产生塑性变形，形成高精度的对中和取向基准，再加上四个小平面支撑（如图 2.5-52），提供了电极充分的定位精度。无论是弹簧片或铝压铸夹头与锥柄，比十字双 V 形夹头都要便宜，而且接触面积小，抗污染性能好。这种按过定位弹性或塑性变形补偿原理设计的电极夹头，重复定位精度在 2~3 μm。



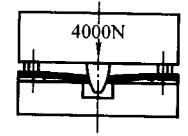


图 2.5-51 四个方孔弹簧片夹头

瑞士 EROWA 公司根据夹具的原理，逐项解决其制造技术的难点，例如定位弹簧片用非常精密的精冲模具加工，保证精度和一致性；十字定位斜楔，用金刚滚轮精修的成形砂轮加工，精确保证 90°。

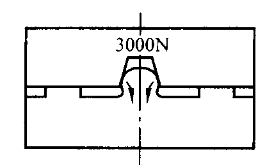


图 2.5-52 十字分布的斜榫槽夹头

类似的弹性齿定位的结构还有很多，例如 3R 公司采用线切割、铣削或焊接成形的四对悬伸弹簧板结构（如图 2.5-53）及三点式单悬伸弹簧板结构（如图 2.5-54），用于较小的电极连接中；为安装大型电极或工件，应采用桥式弹性齿结构（如图 2.5-55、图 2.5-56）。来保证定位精度和重复定位精度。

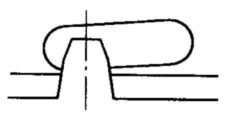


图 2.5-53 四对悬伸弹簧板结构

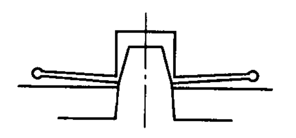


图 2.5-54 三点式单悬伸弹簧板结构

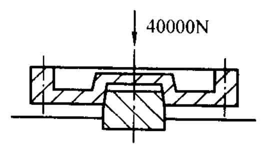


图 2.5-55 弹性齿盘式结构

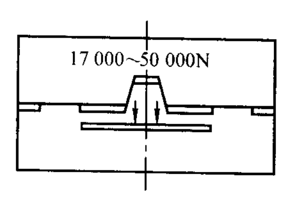


图 2.5-56 桥式弹性齿结构

快换夹具不仅节省调整时间，还是工序自动化的基础。在各工序间 周转时快捷精确，可用以自动更换工具电极，从而可实现无人操作。

近年来瑞典 3R 公司和瑞士 EROWA 公司研制生产了系列化的高精度电极通用夹头，定位精度和重复定位精度高，可达 2 μm 左右，互换性好，可做到一分钟快换装夹。

（2）平动头

电火花加工时粗加工的火花放电间隙比中加工的要大，而中加工的火花间隙比精加工的亦要大一些。当用一个电极进行粗加工，将工件的大部分余量蚀除掉后，其底面和侧壁四周的表面粗糙度很差，为了将其修光，就得转规准逐挡进行修整。由于后挡规准的放电间隙比前挡小，对工件底面可通过主轴进给进行修光，而四周侧壁就无法修光了。平动头就是为解决修光侧壁和提高其尺寸精度而设计的。

平动头是一个使装在其上的电极能产生向外机械补偿动作的工艺附件。它在电火花成形加工采用单电极加工型腔时，可以补偿上一个加工规准和下一个加工规准之间的放电间隙差和表面粗糙度值之差。

平动头的动作原理是：利用偏心机构将伺服电动机的旋转运动通过平动轨迹保持机构，转化成电极上每一个质点都能围绕其原始位置在水平面内作平面小圆周运动，许多小圆的外包络线就形成加工表面，如图 2.5-57 所示。其运动半径 Δ 通过调节可由零逐步扩大，以补偿粗、中、精加工的火花放电间隙 δ 之差，从而达到修光型腔的目的。其中每个质点运动轨迹的半径就称为平动量 Δ。

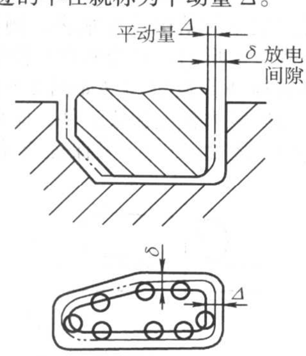


图 2.5-57　平动头原理

1）平动头的结构　一般平动头都由两部分组成，即由电动机驱动的偏心机构及平动轨迹保持机构。

① 偏心机构　国内生产的平动头，其偏心机构大都采用双偏心式（偏心主轴、偏心套）。后来北京机床研究所设计的 DPDT 型平动头采用 45°斜滑轨机构，比原来的双偏心机构结构简单、动作可靠，可以三方向伺服平动。一旦短路时，工具电极不是垂直回退，而是斜向中心回退，很快就可消除短路，加工型孔、型腔有较好的效果。

② 平动轨迹保持机构　现在平动头的形式基本上决定于平动保持机构。国内最早生产的弹簧片式平动头，是通过两对不同平面的弹簧片约束电极支承板，使之产生给定轨迹半径的刚体圆周平移运动，由两对弹簧片及两块支承板组成平动轨迹保持机构。以后又有以四连杆、十字滚动溜板等组成的平动轨迹保持机构，它们分别被称之为四连杆式平动头及十字滚动溜板平动头等。

近年来，有少数专业生产单位已研制出商品的数控平动头，平动轨迹除圆形外，还可作 X、十字等平动，功能大有扩展，是非常有用的功能附件。

2）对平动头的技术要求

① 精度要高，刚性要好。在最大偏心量平动时，椭圆度允差要求 <0.01 mm，其回转平面与主轴头进给轴线的不垂直度要求 $<0.01/100$ mm，其扭摆允差要求 $<0.01/100$ mm，最小偏心量（即回零精度）要求 <0.02 mm。平动头在承受一定的电极质量和冲油压力等外力作用下，变形要小，还要保证各项精度要求。

② 调偏心量方便，最好能微量调节扩大量，能在加工过程中不停机调节。

③ 平动回转速度可调，方向可变，中规准 $n=10\sim100$ r/min，精规准 $n=30\sim120$ r/min。

④ 结构简单，体积小，质量小，便于制造和维修保养。

3）平动加工的特点　与一般电火花加工工艺相比较，采用平动头电火花加工有如下特点。

① 它可以通过改变轨迹半径来调整电极的作用尺寸，因此尺寸加工不再受放电间隙的限制。

② 用同一尺寸的工具电极，通过轨迹半径的改变，可以实现换规准修整。即采用一个电极就能由粗至精直接加工出一副型腔。

③ 在加工过程中，工具电极的轴线与工件的轴线相偏移，除了电极处于放电区域的部分外，工具电极与工件的间隙都大于放电间隙，实际上减小了同时放电的面积，这有利于电蚀产物的排除，提高加工稳定性。

④ 工具电极水平方向移动后，可使加工的表面粗糙度大有改善，特别是底平面处。

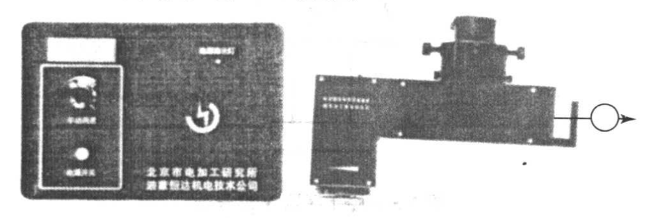
⑤ 由于有平动轨迹半径的存在，它无法加工有清角的型腔。只有采用数控平动头或数控工作台两轴或三轴联动进行摇动加工，才能加工出清棱清角的型孔和型腔，详见后电火花加工的数控系统。

4）平动头的操作及维护保养

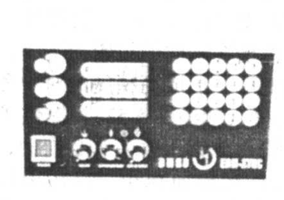
① 平动头的操作方法　平动头一般分停车调节和不停车调节两大类型。停车调节的平动头操作时，要将主轴回升，切断电源，然后松开平动头的锁紧螺钉进行调节。不停车调节的平动头可在放电加工的同时进行调节。偏心量的调节最好要能微量调节，这一点在不停车调节的平动头中易于实现。

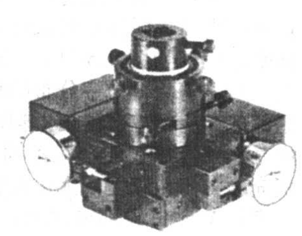
② 平动头的维修保养　不停车调节的平动头，其驱动马达带动的蜗轮副是外裸的，因此一定要用牛油或其他油脂进行润滑，并经常注意防尘保洁。平动头使用一段时期后，可用百分表校对 X、Y 方向偏心量的大小，是否有差异。若差异较大，可将平动头拆开进行清洗加油，并调换磨损件。

图 2.5-58 是北京市迪蒙恒达机电技术有限公司生产的 BJT 型精密平动头和 EDM－XYNC 型数控平动头的外形图。其主要技术参数如表 2.5-9 所示。



(a) BJT 型精密平动头





(b) EDM－XYNC 型数控平动头

图 2.5-58　两种平动头

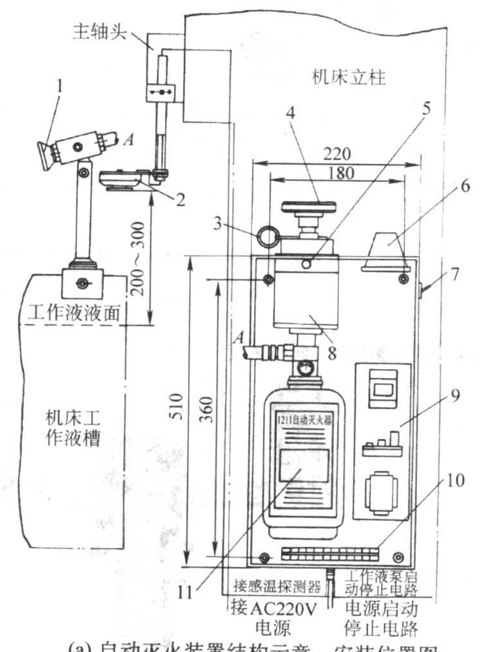
表 2.5-9　两种平动头的主要技术参数

项目 ＼ 型号	BJT－50	BJT－25	BJT－15	EDM－XYNC
最大平动量/mm	±1，±3.5	±1	±1	±5
最小平动量/mm	±0.01	±0.01	±0.01	±0.01
平动不圆度/mm	0.01	0.01	0.01	0.01
平动量调节精度/mm	0.005	0.005	0.005	0.005
承载最大电极重量/kg	50	25	15	15

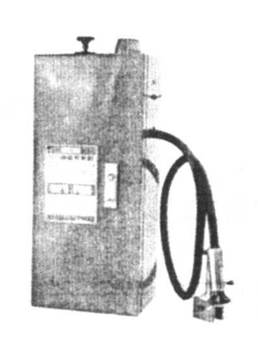
(3) 自动灭火装置

由于电火花成形机使用的可燃性工作液，因此无论机床采取多少措施，工作时仍有发生火灾危险的可能性，自动灭火装置是最后一道防线以保证安全的附件。今以北京市电加工研究所生产的 ZY2－A 型自动灭火装置（如图 2.5-59）为例进行介绍。

1）自动灭火装置主要结构和工作原理 ZY2－A 型自动灭火装置由感温探测器、控制电路和灭火器三部分组成。当出现火灾时，可立刻切断电源，喷出 1211 灭火剂，同时进行声、光报警。其结构示意、安装位置图和外形如图 2.5-59 所示。



(a) 自动灭火装置结构示意、安装位置图



(b) 自动灭火装置外形图

图 2.5-59 自动灭火装置结构示意图和外形图

1—喷嘴；2—感温探测器；3—手动保险销；4—手动手柄；5—运输锁紧螺钉；6—讯响器；7—检查按钮；8—阀体（内装电磁铁）；9—控制电路；10—接线端子；11—钢瓶

① 感温探测器 它安装在主轴头的下方，距工作液液面 200～300 mm 处，或高于工作液槽 100 mm 左右为宜，当火情发生后，温度使热敏元件自动导通，控制电磁阀打开，灭火剂喷出。感应温度为 55～65℃。火灾扑灭后，探头周围低于此温度时便自动切断控制电路。

② 控制电路 控制电路由 220 V 交流供电，经变压器降压、整流、滤波后为 40 V 直流。当起火后，感温探测器达到 60℃即接通直流电源，控制如下动作：a）电磁铁吸合，1211 灭火剂喷出；b）中间继电器的常开触点闭合，讯响器发出刺耳的声音和红颜色的光报警；c）中间继电器的另一常闭触点断开，切断脉冲电源输出，工作液泵停止工作。

控制电路工作是否正常，可通过检查按钮进行检查。当按下检查按钮后，中间继电器动作，讯响器报警，脉冲电源切断输出，工作液泵停止工作，即表示正常。否则表示控制电路有故障。但此时电磁铁的直流电源回路不导通，此时电磁铁不动作，不会喷出灭火剂。

③ 灭火器 由钢瓶、阀体、电磁铁三部分组成。钢瓶内装 1211 灭火剂，有 2 kg 和 3 kg 两种规格，可根据不同规格的机床选用。瓶内额定充装压力不小于 1.5 MPa，由压力表显示。

阀体内装有冲击冲头，当火情发生后，感温探测器导通电路，电磁铁动作，冲头冲破密封膜片，经管路、喷嘴喷出灭火剂。阀体装有冲气阀门供装药手充气用。

为防止出现意外故障，装置中应有手动控制功能，即在电磁铁上装有手动手柄用以手动喷液灭火。

2）自动灭火装置的技术性能

① 型式 卤代烷贮压式。

② 灭火剂 二氟一氯一溴甲烷，代号 1211。

③ 灭火面积 1.5 m^2（2 kg），2 m^2（3 kg），大型机床可同时使用多台灭火器。

④ 装充压力 1.5 MPa ± 0.1 MPa。

⑤ 感温探测器工作电压 DC24 V。

⑥ 感温探测器启动温度 60℃ ± 5℃。

⑦ 环境温度 －10～50℃。

3）自动灭火装置的安装要求

① 自动灭火装置应安装在机床立柱侧面或后面操作者容易接触的位置。钢瓶应垂直地面，不应倾斜。

② 感温探测器安装在主轴头的下部，高度可调，距工作液液面 200～300 mm 处为宜。

③ 灭火器喷管安装在工作液槽的侧壁或后壁上，喷嘴的喷射角度可调，可根据加工件不同的液面高度来选择最佳的方向与角度，如图 2.5-60 所示。

④ 机床安装应留有足够的通道，操作者可迅速到安装处，保证本装置必要时手动的开启。

（4） *C* 轴和 *R* 高速旋转轴

C 轴是精密数控电火花成形机床的专用附件。*C* 轴也称为 *U* 轴，它由步进电机控制，可进行精确的角度转动、定位和旋转伺服加工。*C* 轴与 *Z* 轴联动，可对内外螺纹、内外斜齿轮、螺旋曲线等类似的零件进行加工：*C* 轴与 *X*、*Y* 轴联动，可对齿条、滚筒花纹模具等类似的零件进行加工。数控电火花成形加工机床配上 *C* 轴专用附件，可方便地实现四轴三联动，大大扩展其使用范围。

C 轴结构示意图如图 2.5-61 所示，其各部分名称和作用为：①V 形连接体：用于与标准基座相连接；②四芯插座：用于与 *C* 轴控制线相连接；③冷却油管：其中一根管与工作液槽上的冲油管连接，为进油管对 *C* 轴进行冷却，另一根为回油管，油直接回到工作液槽中；④刻度环：用于观察旋转的角度值；⑤同轴调节螺钉：调整被夹持件与回转

轴的同轴度；⑥刻度环锁紧螺钉；⑦夹头锁紧螺母；⑧垂直方向调节螺钉：调整被夹持件与工作台面 X、Y 两方向的垂直度；⑨垂直锁紧螺钉；⑩同轴锁紧螺钉；⑪夹头。

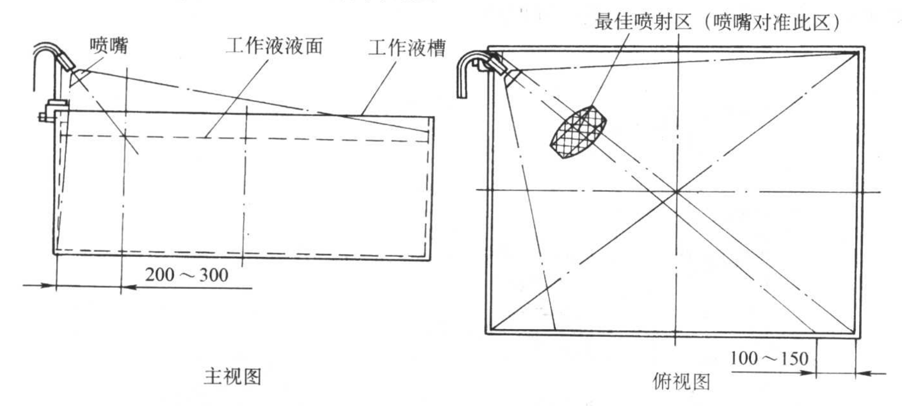


图 2.5-60　灭火器喷射方向和角度

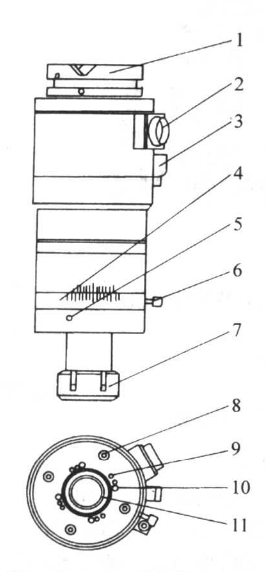


图 2.5-61　C 轴结构示意图

1—V 形连接体；2—四芯插座；3—冷却油管；4—刻度环；5—同轴调节螺钉；6—刻度环锁紧螺钉；7—夹头锁紧螺母；8—垂直方向调节螺钉；9—垂直锁紧螺钉；10—同轴锁紧螺钉；11—夹头

C 轴的调整方法：调整前应使锁紧螺钉 9、10 处于松弛状态。首先调整垂直方向：旋转 C 轴使调整螺钉 8 在 X、Y 轴平行的位置后，调整螺钉 8，使被夹持件与工作台面 X、Y 两方向垂直；然后调整同轴度：旋转 C 轴使调节螺钉 5 在与 X、Y 轴平行的位置后，调整螺钉 5，使被夹持件与回转轴的同轴方向找正；垂直、同轴应反复调整 2～3 次直至满足要求，调整好后，锁紧螺钉 9、10，调整完毕。

C 轴的主要技术参数有：①最小分度（分辨率）360°/162000（8″/单步）；②转动速度 10～60 r/min；③定位精度 ±1′；④最大加工电流 12 A；⑤最大承载重量 7.5 kg；⑥夹头夹持范围 ϕ3～10 mm、ϕ6～20 mm。

R 高速旋转轴：主要用于轮廓加工、小孔和小孔电极的反拷贝和修整加工等。用可调速伺服电机通过齿形带轮减速控制轴的转速，转速在 0～1 500 r/min 范围内可调。其外形和结构示意图见图 2.5-62a，b。

（5）磁力吸盘

由于电火花成形加工的宏观作用力不大，故可用磁力吸盘将底面较大的工件靠磁力吸住进行加工。

带开关磁力吸盘一般分超薄型、强力型、单倾型、双倾型、圆形、矩形、密极形等多种，其规格大小形状不一样，例如山东临清机床附件厂生产的超薄型磁力吸盘，形状见图

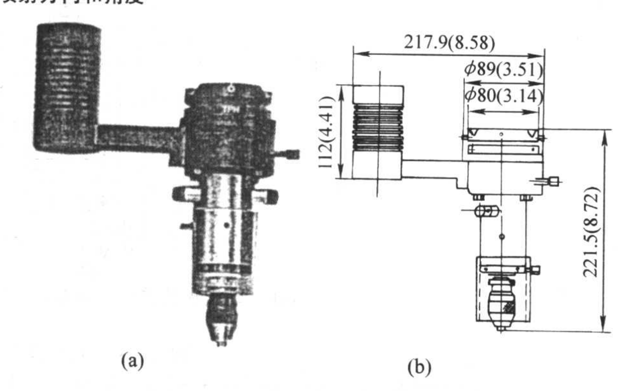


图 2.5-62　R 高速旋转轴结构示意图

2.5-63，规格见表 2.5-10。其用途均为吸附被加工的工件或形状各异的各种模具等。使用方法简单，吸着力强，便于工件的装夹。使用完毕后应保持工作面的干净，定期清理，涂油防锈，放在专用保管箱内。

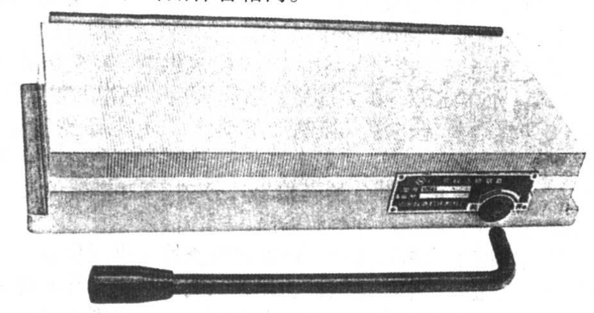


图 2.5-63　带开关磁力吸盘

表 2.5-10　带开关磁力吸盘的尺寸规格

型号	主要尺寸/mm			吸力/N·cm^{-2}	净重/kg
	长 L	宽 W	高 H		
XB41 150×300	300	150	28	≥80	11
XB41 150×350	350	150	35	≥80	13
XB41 150×400	400	150	40	≥80	16
XB41 150×460	460	150	40	≥80	17.5

2　电火花加工用的工作液过滤系统

电火花加工机床的工作液过滤系统是整机的重要组成部分。主要任务有两点：①向工件加工区域输送干净的工作

液，以满足电火花加工应在液体介质中进行的要求；②根据加工工艺的要求，能实现各种冲抽液的方式。

2.1　工作液过滤系统的主要组成部分和作用

电火花加工用的工作液过滤系统主要由工作液泵、储液箱、过滤器、管道、冲抽油方式控制部分及工作液压力调整部分等组成。其原理如图 2.5-64 所示，其外观结构如图 2.5-65 所示。工作液过滤系统为满足加工需要，应既能实现向加工区域输送干净的工作液，又能进行冲抽油方式加工。其工作过程是：储液箱 1 中的工作液首先经粗过滤器 2、单向阀 20 吸入涡流泵 3，经过各种结构形式的精过滤器 6，将工作液输向机床工作台面上的工作液箱 19，待油注到规定高度位置时，多余的工作液从溢流口回到储液箱 1 中，形成循环系统。溢流安全阀 5 是控制系统工作压力的，可根据实际需要进行调整，但最高工作压力不超过 0.3 MPa，其压力值由进油压力表（0～0.6 MPa）4 显示。快速进油调整手柄 13 用来改变进油流量，同时还可配合冲抽油压力调整旋钮改变系统压力，从而改变冲抽油压力。冲抽油切换手柄 14 用来改变工作箱中冲抽油接口的工作方式。当手柄放在冲油位置时，接口也跟着变为冲油，并通过冲油压力调节旋钮 10 调节冲油接口中的压力，由冲油压力表（0～0.2 MPa）15 显示压力值；当手柄放在抽油位置时，接口也跟着变为抽油，真空阀 12 与抽油接口接通，压力工作液穿过真空阀 12，利用流体速度产生负压，达到实现抽油的目的，此时调节进油调整手柄 13 加大系统压力，同时旋转抽油压力调节旋钮 11 改变抽油负压的大小，由抽油压力表（－0.1～0 MPa）18 显示压力值。放气阀 8 的作用是新机床启用或每次更换新纸芯后，过滤桶内存有空气。在涡流泵 3 打开前需将放气阀 8 首先旋松（注意旋松 2～3 圈即可，不要全部取下），然后启动涡流泵 3，此时会有气体从放气阀 8 中排出，当空气放完后，会有少许工作液流出。此时马上将放气阀 8 旋紧，即完成放气过程。在其后的使用中无需再放气。

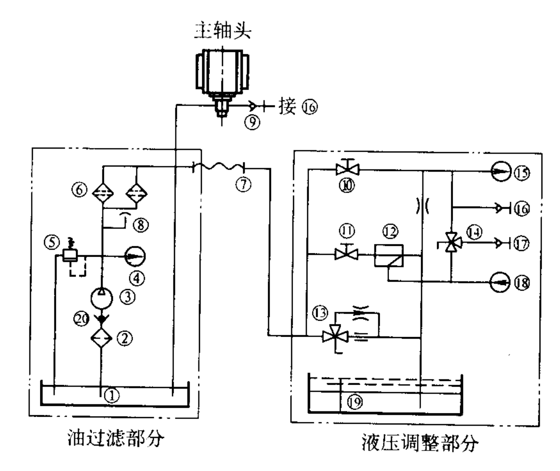
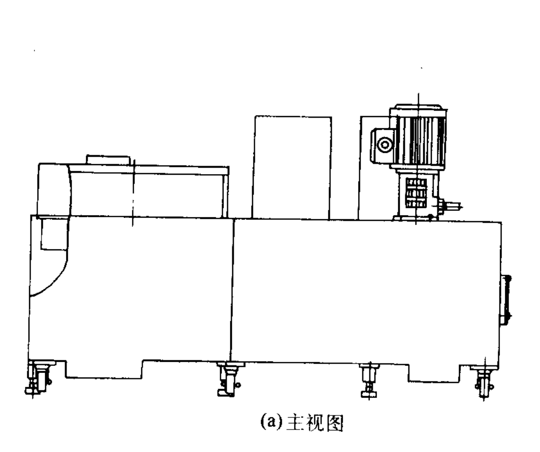
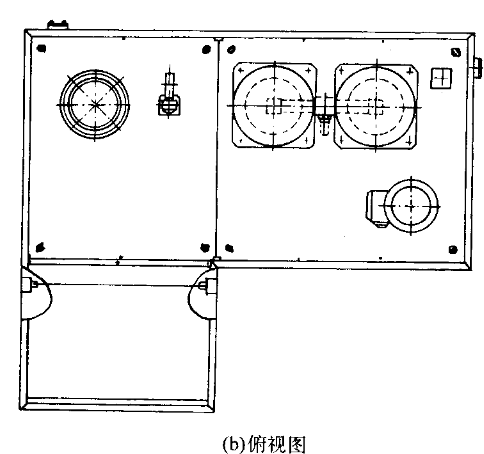


图 2.5-64　工作液过滤系统原理图

1—储液箱；2—粗过滤器；3—涡流泵；4—进油压力表；5—溢流安全阀；6—精过滤器；7—管接头；8—放气阀；9—主轴头冲油快换接头；10—冲油压力调节旋钮；11—抽油压力调节旋钮；12—真空阀；13—进油调整手柄；14—冲抽油切换手柄；15—冲油压力表；16—冲油快换接头；17—冲抽油快换接头；18—抽油压力表；19—工作液箱；20—单向阀



(a) 主视图



(b) 俯视图

图 2.5-65　工作液过滤系统外观结构

工作液循环方式按电蚀产物的排出方式可分为以下几种，图 2.5-66 为工作液循环方式示意图。其中 a 为上冲油，b 为下冲油，c 为上抽油，d 为下抽油，e 为侧喷射。冲油 a、b 是把经过过滤的清洁工作液经油泵加压，强迫冲入电极与工件之间的放电间隙里，放电蚀除的电蚀产物随同工作液一起从放电间隙中排出，以达到稳定加工。在加工时，冲油的压力可根据不同工件和几何形状及加工的深度随时改变，一般压力选在 0～0.2 MPa 之间。抽油 c、d 是直接将放电间隙中电蚀产物抽出，并将清洁工作液补充在放电间隙中，这种方式必须在特定的附件抽油装置上完成。对盲孔加工采用 a 和 c 方式，从图中可看出采用冲油的方法循环效果比抽油更好，特别在型腔加工中大都采用这种方式，可以改善加工的稳定性。侧喷射 e 是在电极和工件都不易加工冲抽油孔的情况下使用，特别适宜深窄槽的加工。

2.2　工作液过滤系统设计和使用时的注意事项

1）在危险性较大的部位应考虑采用多种安全防护装置，加工过程中的工作液防火，应有液位、液温监测和控制器，自动灭火器。

2）机床使用的可燃性工作液的闪点必须在 70℃以上。使用可燃性工作液的机床，应进行下列防燃措施设计：①采用可靠的液面高度自动监测装置（液面控制器），并与相应的控制装置联锁。液面不在规定的高度以上，机床不能放电加工。②采用可靠的液温自动监测装置（液温控制器），并与相应的控制装置联锁。在工作液温度≥60℃时，机床不能放电加工。③机床应配备自动灭火器和预留自动灭火装置接口。自动灭火装置应与机床总电源联锁。

3）工作液循环和过滤系统包括管路、阀、容器、管接

头等处不得渗漏。

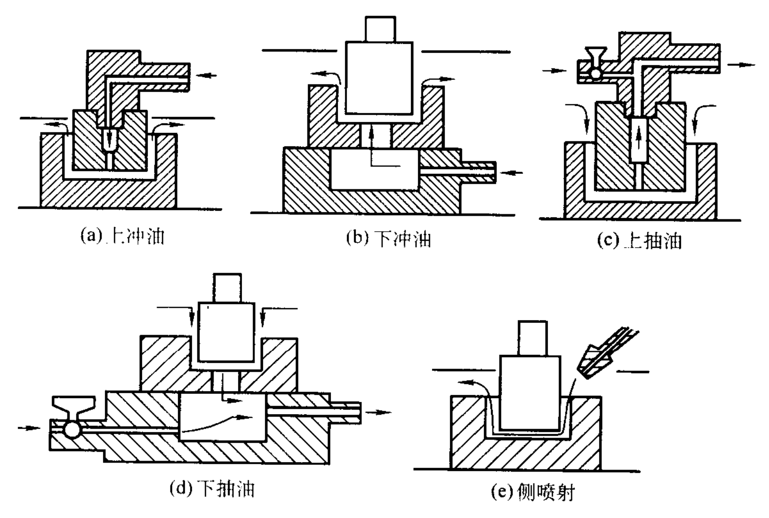


图 2.5-66 工作液循环方式示意图

4）工作液管路必须耐压。管路系统应在承受 1.5 倍的工作液最大压力时能正常工作，以避免管路可能崩裂时造成机械故障和高压流体的喷射危险。

5）电火花在加工过程会产生大量的热量，特别是粗加工产生的热量更大。对于普通电火花加工机床，箱的容积为工作液箱容积的 2.5～3 倍；对于精密数控电火花加工机床，一般放置在恒温车间下工作，有些工作液系统还自带冷却系统进行热交换，故储液箱的容积与工作液箱容积比可小于普通电火花加工机床，为 1.5～2.5 倍。

2.3 对过滤器结构的要求和选择

目前国内外电火花加工用的工作液主要成分是煤油，加工过程中产生的电蚀产物（包括蚀除的工具电极与工件的材料微粒及工作液的裂解产物等）颗粒很小，若不及时予以去除，悬浮在工作液的微小颗粒将会导致加工不稳定，影响加工效率和加工表面质量。为此，工作液系统中必须采用过滤装置，以及时将加工产生的蚀除产物滤掉，保持工作液的清洁，使放电过程能稳定持续地进行。

（1）介质过滤器

早期使用木屑、黄砂或棉纱等作为介质制成介质过滤器，其优点是价格便宜，容易获取，但由于过滤时通过的面积只是过滤容器的表面积（如图 2.5-67 所示），相对尺寸的过滤面积小，不适于大流量、粗加工，且由于进液口污物堆积，很快就使通过的阻力加大，过滤流量逐步下降，同时介质吸有大量油质，每当过滤器堵塞（通常靠观察进油压力表的示值读数来判别，即压力表的示值远大于规定的数值；

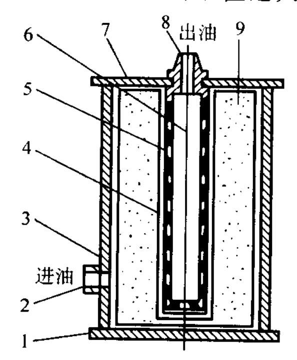


图 2.5-67 介质（木屑）过滤器

1—底盖；2—管接头（进油口）；3—外壳；4—纱布；5—铜纱网；6—芯管；7—端盖；8—管接头（出油口）；9—木屑

或通过观察进油量明显减少）时，就需更换过滤介质，介质吸附的大量油质就随之消耗了。由于长时间压力工作液的冲压作用和蚀除产物的浸渍，过滤介质变得很密实，清除起来相当困难。

（2）纸芯过滤器

20 世纪 80 年代初，上述介质过滤方式逐步被纸介质过滤器所取代。纸芯过滤器结构形式如图 2.5-68 所示。纸芯过滤器的优点是过滤的精度较高，阻力小，更换方便，本身的耗油量比木屑等少得多，特别适合各种类型电火花加工机床，一般可连续应用 250～500 h，用后反冲或清洗，仍可继续使用，而且有专业过滤纸芯生产厂制成标准配件可供订购，故现已被设计者大量应用。过滤纸芯的外形结构如图 2.5-69a、b 所示。它是将滤纸折成内外交错的齿轮状，如图 2.5-69c 所示为过滤纸芯断面结构。为提高其承受工作液压力的能力，在纸芯内部放有一个多孔的金属骨架。折叠的纸芯使过滤面积大大增加，减少了过滤阻力，污物均匀地沉积在滤纸表面。当污物过多，流量不能满足使用要求时就要更换过滤纸芯，纸芯吸附的煤油比老式过滤器要少得多，而且纸芯很容易装拆。

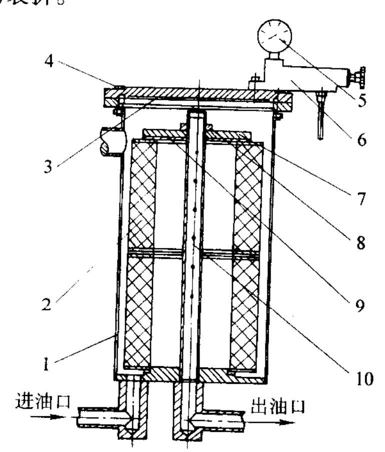


图 2.5-68 纸芯过滤器结构形式

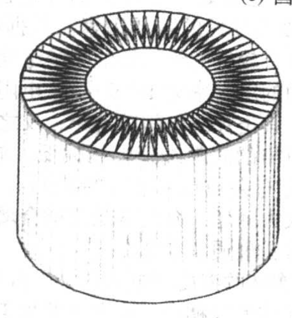
1—滤桶；2—过滤纸芯；3—桶盖；4—螺钉；5—压力表；6—溢流阀；7—压板；8—螺母；9—密封垫；10—芯轴

过滤纸芯一般有两种材质：①棉浆纸致密，可制成过滤精度为 2～3 μm 的过滤器，用于水基电火花工作液过渡；②木浆纸耐油，可制成过滤精度为 9 μm 的过滤器，用于油基电火花工作液过滤。



(a) 国内产过滤纸芯

(b) 国外产过滤纸芯



(c) 过滤纸芯断面结构

图 2.5-69　过滤纸芯的外形结构

(3) 其他方式的过滤器

1) 沉淀式过滤器　沉淀式过滤器主要用于粗过滤，适用于粗加工量大的大型机床，其过滤原理是蚀除物靠重力自然沉淀并集中在一起，沉淀后的工作液再进入到精过滤，为增加沉淀式过滤的效果，可在结构中设计斜板，增加沉淀路径和沉淀面积。这种过滤方式的优点：不消耗动力，利于蚀除物的收集和清理，可延长精过滤纸芯的寿命。缺点是占地面积和体积较大。

2) 离心式过滤器　离心式过滤也是一种较好的过滤方式。当工作液进入旋转的转鼓时，由于离心作用，使工作液中的蚀除产物沉积在转鼓上，来实现工作液过滤的目的。

3) 磁选方式过滤器　磁选的方法仅适于混粉电火花加工，用磁铁吸去电蚀产物中的钢铁小屑微粒。

4) 磁力液力旋流器式过滤器　将磁力液力旋流器用在电火花加工工作液处理装置中，这种形式的过滤器可同时适用于普通电火花加工和混粉电火花加工工作液蚀除产物的分离处理。

磁力液力旋流器式过滤器装置结构如图 2.5-70 所示。主要由液力旋流器、电磁装置、泵－马达送液装置、沉渣处理装置、过滤后工作液回油装置和沉渣盒等辅助件组成。其工作原理：液体进入液力旋流器后呈螺旋线状，一面回转，一面向中心推移，粗颗粒因惯性离心力大而被抛向器壁，并逐渐向下流动成为沉渣，最后由下端底流沉渣口排出，进入沉渣盒；细颗粒向器壁流动的速度较小，被向中心流动的液体带动而由位于上部中心的过滤后的工作液流出口排出，回到储液箱。

液力旋流器是这种过滤方式的关键件，其结构的形状决定了过滤效果和过滤精度。电磁装置是为了更好地利用液力旋流器进行分级、分离，以及克服普通液力旋流器所存在的某些缺陷，采用底流型磁力结构，使旋流器内的径向力系中，除原有离心力、向心浮力和流体曳力外，再增加一个磁力，从而优化含磁性颗粒物料的分级、分离。它的特点有：

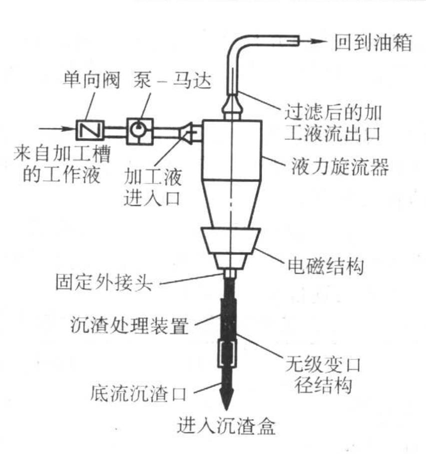


图 2.5-70　磁力液力旋流器式过滤器装置结构

结构简单，成本低廉，易于安装，操作方便；体积小，节省现场空间，处理能力大，可在线（循环）使用；旋流中较高的剪切力，可破坏颗粒间的凝聚，有利于固相颗粒分级；用途广泛，可完成液体澄清、固体颗粒分级、分类及加工渣的分离。

2.4　工作液的作用和选择

2.4.1　工作液的作用

在电火花成形加工中，一般在液体介质中进行。液体介质通常叫做工作液。工作液与脉冲电源及控制系统一样，也是实现正常电火花加工不可缺少的条件。工作液的作用主要如下。

1) 压缩放电通道，并限制其瞬时扩展，使放电能量高度集中在极小的区域内，即加强爆炸蚀除能力，又提高放电仿型的精确性。

2) 加速电极间隙的冷却和消电离过程，有助于防止出现有害的电弧放电。

3) 加速电蚀产物的抛出和排除，有助于稳定加工。

4) 有助于加强电极表面的覆盖效应和改变工件表面层的物理化学性能。在负极性粗加工时，工具电极上形成炭黑膜可大大降低电极损耗率。

2.4.2　工作液的主要物理化学性质

工作液不仅对加工效率、精度、电极损耗等工艺指标直接产生影响，也对环保、安全、使用寿命有直接的关系，涉及物理化学、有机化学、电化学、胶体化学等多个学科领域。

电火花成形加工工作液，根据其来源和成分，大致可分为两大类。

一类是来自天然石油的碳氢化合物，其成分主要由碳和氢元素组成，一般含有三种化合物：芳香烃、环烷烃和链烷烃的混合物。采用蒸馏提纯的方法，可将不同组分的化合物分离出来。例如主要含芳香烃的煤油就是采用蒸馏的方法从天然石油中分离出来的。从使用安全和环保要求看，在电火花加工中，不提倡使用煤油，而是鼓励更多地使用含链烷烃成分化合物的油类。

另一类是人工合成的工作液。这种工作液是利用某些化合物合成作用制成的油类。例如使烯烃类碳氢化合物产生聚合作用而制成的电火花加工专用油。这种工作液与第一类比较，虽然价格较高，但具有稳定性好、闪点和着火温度都较高、挥发性小，且无腐蚀性、无毒害等优点。

(1) 工作液的主要物理化学性质

1) 闪点和自动着火温度　闪点的定义：当工作液暴露在空气中时，工作液表面分子蒸发，形成的工作液蒸气在空气中的浓度随工作液温度的上升而增大，当工作液蒸气和空

气的比例达到某一数值并与外界火源接触时，蒸气和空气的混合物会产生瞬时引燃爆炸，此时的温度就是该工作液的闪点。

自动着火温度的定义：在工作液温度不断上升过程中，无外界点火源的情况下工作液自动着火燃烧的温度就是该工作液的自动着火温度。

一般来说，工作液的闪点低于自动着火温度。闪点越高，成分稳定性越好，使用寿命也越长。表2.5-11列举了几种工作液的闪点及其自动着火温度。

表 2.5-11　几种工作液的闪点及其自动着火温度

工作液	闪点/℃	自动着火温度/℃
天然 EDM 工作液	126	210
合成 EDM 工作液	130	219
煤　油	38	251
柴　油	38	250

2）黏度　黏度是液体流动阻力大小的一种量度。该阻力来自于液体内部的摩擦作用。这是由于该液体溶剂分子层与相邻分子层在相对移动时产生的摩擦力而引起的。黏度值较高的液体其流动性差，流动缓慢而呈现黏滞性。黏度通常用动力黏度、运动黏度或内摩擦系数来表示。黏度随温度的上升而降低，流动性变好。几种工作液的黏度值见表2.5-12。

表 2.5-12　几种工作液的黏度值

工作液	黏度/Pa·s
工作液 180	0.165（40℃）
工作液 200	0.225（40℃）
煤　油	0.001 7（20℃）
水	0.001 0（20℃）

工作液黏度低有利于加工间隙中工作液的流动，将蚀除产物带走，使加工间隙及时恢复正常状态。当然，对电火花加工来说，对工作液的要求并不能只考虑黏度，还必须考虑到使用安全、使用寿命、加工效率、电极损耗等综合因素。

3）氧化稳定性　工作液的氧化是由于工作液成分和空气中的氧产生化学反应而引起的，往往产生沉淀物或变质。氧化作用随温度的升高或某些金属（例如铜）的催化作用而加速，也随时间而增强，同时使工作液的黏度增大。因此氧化的稳定性是工作液性能的重要标志。越是在工作温度较高的情况下越是要求工作液具有较好的稳定性，特别是在工作液与水，催化性金属或残渣物有接触的情况下，其氧化作用更会加剧。所以在选用工作液时，必须对其氧化稳定性加以密切的注意，不宜选用市场上一些价廉而质量低的工作液，其使用寿命必然是很短的。

4）酸值　工作液的酸值或酸性表示出该工作液的使用期限（或寿命）达到何种程度。在使用过程中，可以对工作液的酸值进行检测。工作液的酸值是用中和一定量（通常为1 g）工作液所需的氢氧化钾（KOH）的毫克数来表示。工作液的酸值主要与其含有的有机酸成分有关。工作液酸值的容许量最大为0.5，如超过此值则表示此工作液已不能继续使用，必须更换。

工作液的酸值也是其氧化稳定性的一种量度。酸值越低，其稳定性越高，则工作液的使用期限也越长。

5）挥发率（即挥发速度）　工作液的挥发率（或挥发性）也是一项重要的性能指标。应要求工作液的挥发性尽可能小。当然工作液的挥发率不可能为零。低挥发率的工作液意味着工作液的自然损耗量很少，而且对操作人员的健康有利。

6）苯胺点　工作液的苯胺点是衡量它对其他物质溶解能力的一种量度。它是用相等体积的工作液和苯胺相互溶解时所需的最低温度来表示。苯胺点越高，其溶解能力越弱；苯胺点越低，其溶解能力就越强。芳香烃类碳氢化合物的苯胺点较低，所以其溶解能力很强。环烷烃类化合物的苯胺点高于芳香烃而低于烷烃，具有中等程度的溶解能力。

对于苯胺点很低的工作液，说明其含芳香烃类的成分较多，溶解能力很强，所以电火花机床中的软管、密封圈、垫片等塑料、橡胶制品与其接触时会发生溶解作用，导致损坏，或者很快老化，还可能引起工作液管路系统等部分的泄漏。

7）导电性或介电常数　工作液的导电性（或绝缘性）也是影响电火花加工过程的重要因素。根据电火花加工机理，要求工作液具有较好的绝缘性能。绝缘性能一般用电阻率来评价，纯煤油的电阻率为$10^6\ \Omega\cdot cm$，电阻率愈高，表明其绝缘性能越好，其击穿放电间隙愈小，反之，则表明绝缘性能差，加工中所需的间隙击穿电压偏低，放电间隙偏大。一般在工作液中含有杂质或污物，特别是含有水分的情况下，其电阻率会大大降低，介电常数值就会增大。电火花加工工作液的介电常数值通常在2左右。

8）密度　工作液的密度对电火花加工过程有很大影响。若密度过大，则工作液较稠密，在电火花加工时产生的蚀除金属微细颗粒就会悬浮于工作液中，停留很长时间而不易沉降下来，使工作液呈现混浊状态，导致火花放电时产生"拉弧"现象，或者二次放电。严重影响加工稳定性。电火花加工工作液的密度不能太大，一般在0.65 g/mL左右较好。

9）含硫量和气味　电火花加工工作液的含硫量必须很低，因为硫富于化学活性和腐蚀性并产生气味，特别是加工过程生成的烟雾，对大气环境会造成影响。一般要求工作液的含硫量不能超过3×10^{-6}（摩尔分数）。《环境空气质量标准》（GB 3095—1996）对二氧化硫和苯并［a］芘污染物的浓度限值作了规定，见表2.5-13污染物的浓度限值。

表 2.5-13　污染物的浓度限值

污染物名称	取值时间	浓度限值			浓度单位
		一类区一级标准	二类区二级标准	三类区三级标准	
二氧化硫 SO_2	年平均 月平均 一小时平均	0.02 0.05 0.15	0.06 0.15 0.50	0.10 0.25 0.70	mg/m^3（标准状态）
苯并［a］芘 B［a］P	日平均	0.01			$\mu g/m^3$（标准状态）

另外，工作液的气味也是衡量其质量的一项标志。如果工作液带有类似燃料油之类的气味或其他溶剂的气味，则表明该工作液质量差，或已变质，因而不能使用。

10）颜色　高质量的电火花加工工作液应是无色、澄清、透明的。一些带有淡黄色或灰暗不透明的工作液都是用低质量原料油制造的，这些颜色不正常的工作液，不能用于电火花加工，其成分是有害的。并具有氧化稳定性差、很容易变质，产生难闻气味、使用寿命短、对过滤纸芯产生不良影响等缺陷，因而都不能使用。

11）芳香烃含量　任何油类其芳香烃含量如超过0.05%都是极有毒害作用的。芳香烃类化合物主要是甲苯和苯，这些芳香烃在电火花加工工作液中的含量不能超标。一些低质



量的工作液往往含有过量的芳香烃化合物，有时竟高达17%，因而不能使用。

(2) 电火花加工专用液应满足的要求

1) 黏度应尽量低以便工作液快速通过狭窄的放电间隙，将放电产生的蚀除物冲走并带走加工产生的热量。

2) 不易蒸发。闪点应尽量高以免大量工作液蒸发损失，并避免火灾的危险。

3) 化学性质应为惰性，不致对电极、被加工件和机床有侵蚀作用或其他变化，不能产生有害有毒烟雾。

4) 易于分离。加工的蚀除颗粒能够很快除去，并迅速沉淀下来，不致影响工作液的循环使用。

5) 具有良好的老化安全性。不易结焦，长时间使用后仍能保持化学稳定性。

6) 对人体皮肤无刺激作用。

7) 对密封材料无损害。

(3) 较佳工作液的主要性能指标

1) 高氧化稳定性　根据ASTM标准，大于600 min。

2) 低黏度　32～36 s（按SUS，38℃）。

3) 高绝缘强度　根据ASTM标准，大于50 kV。

4) 无气味。

5) 低密度　小于0.65 g/mL。

6) 低芳香烃含量。

目前，电火花加工工作液还未制定技术标准，各公司都是根据各自对工作液的要求而制成专用的工作液，因此，必须重视对工作液的物理化学性质及其成分的研究工作并加以推广，使工作液朝着专用化和统一化的方向发展。

2.4.3　工作液的选择

目前，国内大部分厂家主要使用普通煤油和电火花加工专用液作为工作液。表2.5-14给出了普通煤油与电火花加工专用液主要差异及优劣比较，表2.5-15给出了电火花加工专用液的生产厂家和性能指标，供选择时参考。

表2.5-14　普通煤油与电火花加工专用液主要差异及优劣比较

项　目	普通煤油	电火花加工专用液
色泽及嗅味	气味重，使用后设备发黄	无味、无色、始终清澈如水
人体嗅觉适应性	不适应且易造成头晕、不适，有毒、伤皮肤	无反应，无毒，对人体无影响
闪点（开口）	40℃，易燃危险	90～110℃，不易燃，安全
挥发性及厂房环境	高挥发性。因高油雾性，厂房地板有油、打滑，环境差	低挥发性。因低油雾性，厂房无油污，环境较好
耗用量及使用寿命	易被工件带走且用量多，是电火花加工油的4倍，利用率低，寿命短	被工件带走少，需量是煤油的1/4倍，利用率高，寿命高
防锈性及与防锈油相容性	防锈性差，与防锈油相容性差	防锈性好，与防锈油相容性好
热传导性	普通，油温升高快	优，不致使工件回火
环保性及附加价值	易污染环境，有环保之忧，并且会造成过滤器频繁更换	本身生物可分解性高，可先当清洗剂后再当加工油用

表2.5-15　电火花加工专用液的生产厂家和性能指标

项　目	性能指标						
	中国隆普公司			宁波愉华	南京金陵	美国	
	LP－180	LP－200	LP－250	润倍EDM－1	G－1	美孚	飞登
闪点（闭口）/℃	＞70	＞80	＞120	110	≥110	98	83
密度/g·cm^{-3}	0.749	0.795 0	0.801			0.762	0.760
运动黏度/mm^2·s^{-1} 20℃ 40℃	 ＜2.0 ＜1.3	 ＜3.5 ＜2.4	 ＜6.0 ＜3.6	2.0～2.1	≤2.2	1.83	2.00
凝点/℃	＜－24	＜－5	＜－5	－10			
酸值/mgKOH·g^{-1}	＜0.01			0.01	0.01	0.01	
色泽（塞波特比色）	＞＋25			无色透明	水白色清亮透明	无色透明	无色透明
嗅味	极微			无异味无刺激	无异味	无	
芳香烃含量				接近0			
水分				无	无		

3　电火花加工用的脉冲电源

3.1　概述

(1) 脉冲电源的作用及加工对脉冲电源的要求

脉冲电源的作用是在火花加工过程中向工具电极和工件之间提供放电能量来蚀除金属。由于放电过程中存在着极性效应和传热效应，所以不用交变脉冲而采用单向直流脉冲。

对脉冲电源总的要求是：

1) 单个脉冲的能量（脉宽×峰值电流）可调；

2）脉冲上升、下降沿有一定的陡度，最好上升沿的陡度可调（梯形波），以在必要时降低工具电极的损耗率；

3）高效率、低损耗，必要时具有一定的脉冲波形，如高低压复合波、分组脉冲波等；

4）稳定、可靠、安全、环保，更进一步是向自适应、智能化等方向发展，有高的性能价格比。

（2）脉冲电源的发展变革及组成部分分类

脉冲电源自发明至今已有60余年的历史，它的发展主要是随着电力电子器件的发展而发展的。

1）最早期20世纪50年代是 *RC* 线路、*RLC*、*RLCL* 线路脉冲电源，它们是一弛一张的“弛张”式充放电电源，要靠放电间隙的击穿才能形成脉冲，因此又称非独立式脉冲电源。现在只有 *RC* 线路脉冲电源仍在精密加工或简式电源中获得应用。

2）20世纪60年代曾采用电子管和闸流管作为开关元件的独立式脉冲电源，由于它工作电压太高、工作电流太小而已在生产中被淘汰。

3）20世纪70年代起半导体器件飞速发展，晶体管脉冲电源成为主流，在需要大于100 A大电流输出时也采用晶闸管（可控硅）脉冲电源。

4）近20年脉冲电源的功率输出极大量采用达林顿管、大功率V－MOS管和IGBT等功率集成模块。

随着微电子技术的发展，脉冲电源的控制方式由单一的间隙电压的采样控制进一步发展，又出现了先进的单片机控制脉冲电源、自适应控制脉冲电源、智能化脉冲电源、模糊控制脉冲电源等。这些电源控制水平的提高，使得电源的加工性能越来越好。脉冲电源正在朝着功率越来越大、体积越来越小、电能利用率越来越高、加工质量越来越好的方向发展。

5）脉冲电源的组成部分。首先要有一个参数可调整、脉冲波形可变化的脉冲发生器（主振级）部分，还要有脉冲的功率放大部分，脉冲的功率输出部分，还应有可随机调整加工参数的适应控制部分。为了供给各部分能量，需有对交流电进行变压、整流、滤波的直流电源部分。另外有方便、直观的操作面板部分。

3.2　脉冲电源的脉冲波形及分类

电火花加工用脉冲电源是把普通工频正弦交流电流转变成频率较高的单向脉冲电流。之所以脉冲波形是单向的，即没有负半波，是因为这样才能最大限度地利用极性效应，减少工具电极的损耗。电火花加工中最常用的基本脉冲波形是矩形波（如图2.5-71），又称为等脉冲波形。因为空载电压脉冲宽度相等并可调，电流脉冲宽度随加工状态变化，因此单个脉冲的放电能量在电压幅值不变的情况下是随机变化的。

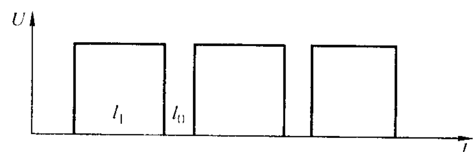


图2.5-71　基本脉冲的电压波形

为了最大限度地提高脉冲电源的加工性能，国内外的学者针对不同需求不断研究出了各种各样的脉冲波形。主要有以下几种。

1）高、低压复合脉冲波形　其特点是利用高压脉冲击穿介质，营造稳定的放电通道，再由低压脉冲提供所需的放电能量。这种脉冲的复合有多种形式，如图2.5-72a、b、c所示，以图2.5-72c的效果为最好。

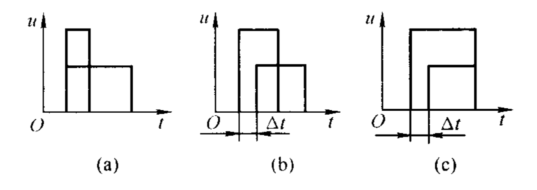


图2.5-72　高、低压复合脉冲波形的3种形式

2）高压包络、低压分组脉冲波形（图2.5-73）　其特点是利用低压分组脉冲形成梳形脉冲电流，以提高放电表面的粗糙度，利用较长的高压脉冲以降低电极损耗。

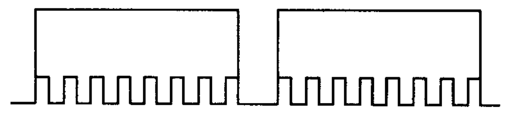


图2.5-73　高压包络、低压分组脉冲波形

3）高频分组波和梳形分组波（图2.5-74）　这两组波形在一定程度上都具有高频脉冲加工表面粗糙度值小和低频脉冲加工速度高、电极损耗低的双重优点。而且梳形分组波在大脉宽期间电压不过零，始终加有一较低的正电压，其作用为当负极性精加工时，使正级工具能吸附碳膜，获得较低的电极损耗。

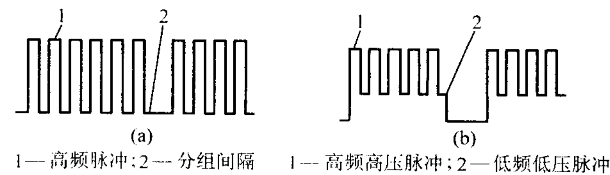


图2.5-74　高频分组波和梳形分组波

4）阶梯波（图2.5-75）　又分为前阶梯波，后阶梯波和前后阶梯波。主要作用是调节电流脉冲的前沿斜率，或后沿斜率，以降低电极损耗。

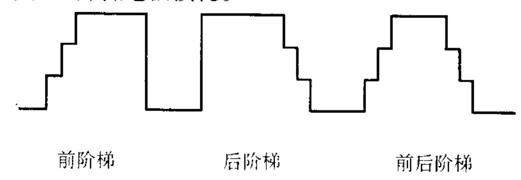


图2.5-75　阶梯波

5）等能量脉冲波形（图2.5-76）　其控制放电脉冲电流的波形为等宽，即电流脉冲的 t_e 值均相等，在电压幅值不变的情况下，以使每个单个脉冲的放电能量相等。达到使加工表面放电凹坑一致、均匀的效果。

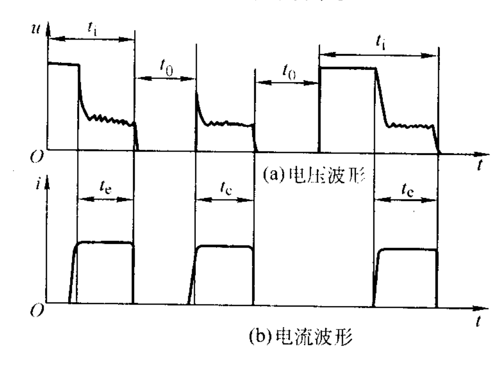


图2.5-76　等能量脉冲波形

以上各种形式的脉冲波形在不同元器件组成的脉冲电源中，实现的方法也各不相同。

3.3 *RC* 线路脉冲电源

RC 线路脉冲电源的工作原理是利用电容器充电贮存能量，而后瞬时放出，形成火花放电，来蚀除金属。因为电容器时而放电，时而充电，一张一弛，故又称为"弛张式"脉冲电源。它是弛张式脉冲电源中最简单、最基本的一种电路，由于它的结构简单、使用可靠，特别是单个脉冲的能量很微小，可产生脉冲宽度很小的窄脉冲，故常用于电源的精加工回路和微细加工电源。

图 2.5-77 是它的工作原理图。它由两个回路组成：一个是充电回路，由直流电源 *E*、充电电阻 *R*（可调节充电速度，同时限流以防电流过大及转变为电弧放电，故又称为限流电阻）和电容器 *C*（储能元件）所组成；另一个是放电回路，由电容器 *C*、工具电极和工件及其间的放电间隙所组成。

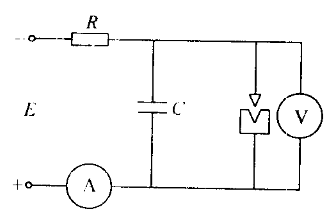


图 2.5-77 *RC* 线路脉冲电源原理图

当直流电源接通后，电源经限流电阻 *R* 向电容 *C* 充电，电容 *C* 两端的电压按指数曲线逐步上升，因为电容两端的电压就是工具电极和工件间隙两端的电压，因此当电容 *C* 两端的电压上升到等于工具电极和工件间隙的击穿电压 U_d，间隙就被击穿，电阻变得很小，电容器上储存的能量瞬时放出，形成较大的脉冲电流 i_e，见图 2.5-78。电容上的能量释放后，电压瞬时下降到接近于零，间隙中的工作液又迅速恢复绝缘状态。此后电容器再次充电，又重复前述过程。如果间隙过大，则电容器上的电压 U_c 按指数曲线上升到直流电源电压 *E*。

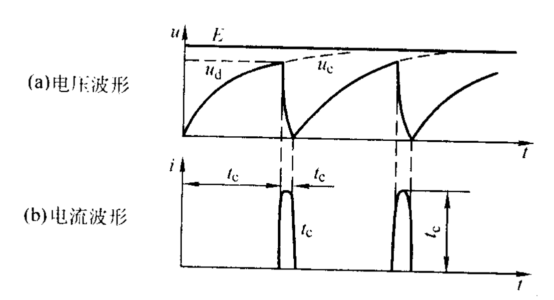


图 2.5-78 *RC* 线路脉冲电压、电流波形图

RC 线路充放电时，电压、电流与时间的关系曲线均为指数曲线，即

电容器上充电电压 $U_c = E\,(1-e^{-t/RC})$ (2.5-1)

电容器上放电电压 $U_c = E \times e^{-t/rC}$ (2.5-2)

电容器上充电电流 $i = \dfrac{E}{R}e^{-t/RC}$ (2.5-3)

电容器上放电电流 $i = \dfrac{E}{r}e^{-t/rC}$ (2.5-4)

式中，*R* 为充电回路的电阻，Ω；*r* 为放电回路的等效电阻，Ω；*E* 为直流电源电压，V；*C* 为充放电电容，μF。

R 与 *C* 的乘积 *RC* 称为充电时间常数，*rC* 称为放电时间常数。理论上，从零充电到电源电压 *E* 需要很长的时间，但当充电时间 $t = 3RC$ 时，电容器上的电压 $u = E\,(1-e^{-3/RC}) \approx E\,(1-0.002) \approx E98\%$ 已基本充满。同样放电时经 3*rC* 时间，即已基本放完。由于 *R*（充电电阻）≫ *r*（放电回路电阻），所以相对而言，*RC* 线路充电很慢，放电很快。

RC 线路充放电周期、频率、平均功率等的计算，此处从略。

RC 线路脉冲电源的最大优点如下。

① 结构简单，工作可靠，成本低。

② 在小功率时可以获得很窄的脉宽（小于 0.1 μs）和很小的单个脉冲能量，可用作光整加工和精微加工。

③ 电容器瞬时放电可达很大的峰值电流，能量密度很高，放电爆炸、抛出能力强，金属在汽化状态下被蚀除的百分比大，不易产生表面微裂纹，加工稳定。

RC 线路脉冲电源的缺点如下。

① 电容器放电速度很快，无法获得较大的脉宽（例如大于 100 μs），因此无法实现长脉宽、低损耗的加工，很难在型腔加工中获得应用。

② 电能利用效率较低，最大不超过 36%，因大部分电能经过电阻 *R* 时转化为热能损失掉了，这在大功率加工时是很不经济的。

③ 生产效率低，因为电容器的充电时间 t_c 比放电时间 t_e 长 50 倍以上，脉冲间歇系数太大。

④ 工艺参数不稳定，因为这类电源本身并不"独立"形成和发生脉冲，而是靠电极间隙中工作液的击穿和消电离使脉冲电流导通和切断，所以间隙大小、间隙中电蚀产物的污染程度及排除情况等，都影响脉冲参数，因此脉冲频率、宽度、单个脉冲能量都不稳定，而且放电间隙经过限流电阻始终和直流电源直接连通，没有开关元件使之隔离开来，所以随时都有放电的可能，并容易转为电弧放电。

为了克服上述缺点，人们逐步在上述简单 *RC* 线路的基础之上开发了新型电路，可以用大功率晶体管或 VMOS 管代替限流电阻 *R* 串联到充电回路中，这样就成为晶体管控制的 *RC* 线路（*Tr－RC*）脉冲电源。晶体管导通时可对电容器充电，电容器开始放电时（取出相应的信号）关断晶体管，放电完毕经过一段停歇时间，再次使晶体管导通，向电容器充电，可以提高充电速度和减小发热损耗。

图 2.5-79 是山东工业大学研制的一种电火花精微加工脉冲电源的原理示意图。

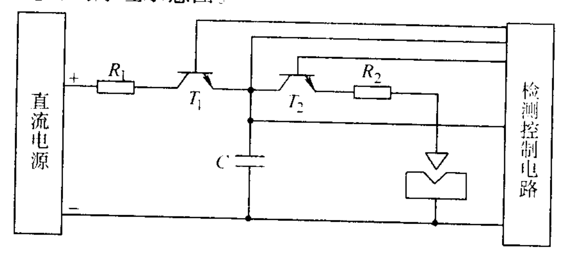


图 2.5-79 精微加工脉冲电源原理示意图

该电路工作时，利用一只开关管 T_1 控制电容器的充电过程，使电容的充电电压保持一致，放电脉冲能量大小基本恒定，保证了工件的加工表面质量；利用另一只开关管 T_2 控制放电通道，使电弧性脉冲放电明显减小。该脉冲电源可以选用阻值小许多的充电电阻而不出现电弧性脉冲放电，因此它的生产率比基本 *RC* 脉冲电源高许多，脉冲放电频率也高许多；同时，脉冲电源电容的放电电压大小一致，工作表面的坑痕较为均匀。故加工质量比 *RC* 脉冲电源高，比较适合于电火花微细加工过程。

3.4 可控硅（又称晶闸管）式脉冲电源

可控硅式脉冲电源是利用可控硅作为开关元件而获得单

向脉冲的。由于可控硅的功率较大，脉冲电源所用的功率管数目可大大减少，因此，100~200 A 以上的大功率粗加工脉冲电源，一般采用可控硅作为大功率输出器件。这种电源一般是大型、甚至超大型电火花成形机床的配套电源。

可控硅器件的电路不论多么复杂，都是由电源部分、主回路部分和触发电路三大部分组成。主回路部分包括：从电源起经过可控硅器件直到负载的全部电路。触发电路则是接在可控硅控制级和阴极之间的那一部分电路。

可控硅的导通和阻断条件是：要使它导通，除了阳极要处于正向电压外，还必须在控制级上加正向触发电压，同时还要求阳极电流大于维持电流。要使可控硅阻断，就必须降低阳极电流使它小于维持电流，或使控制极的电位等于或低于阴极电位。

3.4.1　可控硅脉冲电源的主回路

图 2.5-80 为电容关断式的脉冲电源主回路线路图，通常作为低频粗加工电源。

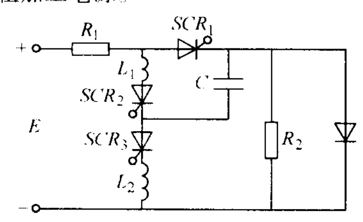


图 2.5-80　电容关断式可控硅脉冲电源

它包括由直流电源 E、限流电阻 R_1、可控硅主功率管 SCR_1、放电间隙电阻 R_2、放电间隙所组成的可控硅主回路及由可控硅 SCR_2、SCR_3，电感 L_1、L_2，电容 C 组的关断回路两个部分。

当主功率管 SCR_1 和可控硅 SCR_3 被同时触发导通后，电流一方面由电源 $+E$ 通过 $R_1 \to SCR_1 \to R_2 \to -E$ 构成回路，将电压加在两极之间；另一方面由 $+E$ 通过 $R_1 \to SCR_1 \to C \to SCR_3 \to L_2 \to -E$ 对电容 C 充电，构成 LC 振荡式充电回路。LC 振荡式充电回路的充电电流是按正弦形式变化的，当充电电流从正半周转入负半周时，电流就反向，从而使 SCR_3 自行关断，此时电容 C 已被充满，极性为上正下负。

当可控硅 SCR_2 被触发导通时，电容 C 向 SCR_1 放电，由于 SCR_1 受到反向电流，所以 SCR_1 被迅速关断，这时电容 C 储存的电荷只消耗掉很小的一部分，仍然保持原来的极性。这时在放电间隙上就出现了一个幅值为 U_c+E 的后尖顶脉冲。然后电容 C 通过间隙电阻 R_2 放电，同时电源 $+E$ 通过 $R_1 \to L_1 \to SCR_2 \to C \to R_2 \to -E$ 对电容 C 反向充电，直至充满，这时极性为下正上负，使 SCR_3 带上正电压；同时 SCR_2 通过的电流小于维持电流，SCR_2 自动关断，而完成一个脉冲放电的过程。使用时为了消除由于后尖顶脉冲所产生的不良影响，可通过在主功率管 SCR_1 上并联一个反接二级管，将带后尖顶波改成方波。

这种低频可控硅脉冲回路的脉冲频率一般约为 400~2 000 Hz，脉宽为 1 500~300 μs。

为了适应精加工的要求，可控硅脉冲电源还必须具有精加工高频（10 kHz 以上）性能，一般可控硅的频率特性满足不了这一要求，需采用高频可控硅，并通过倍频的方法来进一步提高脉冲频率。图 2.5-81 所示为精加工的高频可控硅脉冲电源回路原理图。

图中四只高频率可控硅分为两路，其中 SCR_1 和 SCR_3 为一路，SCR_4 和 SCR_2 为另一路，工作时两路轮流触发导通，相位差为 180°。假定 SCR_1 和 SCR_3 先触发导通，则直流电源 $+E$ 就通过 $SCR_1 \to C \to SCR_3 \to R_2 \to E$ 对电容 C 充电，

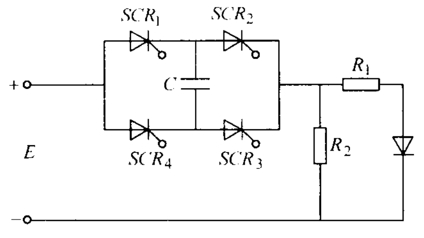


图 2.5-81　高频可控硅脉冲电源

由于电容 C 上电压不能突变，所以电压全部在初始加在 R_2 上（即放电间隙两端）。当 C 被充到满值，$SCR_1 \to SCR_3$ 自行关断（此时充电电流小于可控硅的维持电流），完成一个脉冲的输出，此时电容 C 的极性是上正下负。

经过一定停歇时间（180°）后，SCR_4、SCR_2 被触发导通，则电流 $+E$ 就通过 $SCR_4 \to C \to SCR_2 \to R_2 \to E$ 对电容 C 反向充电，在初始时，电容 C 上原充电电压极性和电流极性正好同向，所以在 R_2 上得到一相相叠加的电压（$E+u_c$），然后对该回路反向充电，使 $u_c=0$，然后继续充电，直至 $u_c=E$ 时，极性为下正上负，此时，SCR_4、SCR_2 自行关断（此时充电电流小于该可控硅的维持电流），又输出一个脉冲。

再次给 SCR_1 和 SCR_3 触发导通，重复上述过程。由上述工作原理可知，在电阻 R_2 上所得到的频率是每个可控硅工作频率的 2 倍，当电容 C 得到完全充电时，R_2 上的电压也近似为电源电压的 2 倍，故此电路为倍频倍压电路。

可控硅脉冲电源高频脉冲回路的工作频率可达到 60kHz，工具电极损耗比较小，能适应型腔模具的加工。随着可控硅脉冲频率的提高、高低压复合回路及适应控制回路的应用，这种脉冲电源在加工型腔模具中将会取得更好的工艺效果。

3.4.2　可控硅电路的触发回路

可控硅脉冲电源的触发电路是十分重要的，触发电路的性能及工作的稳定程度直接影响可控硅脉冲电源的工作。可控硅脉冲电源对触发电路的要求如下。

1）触发电路应输出足够的电压和电流，触发电路施加在可控硅控制级的电压和电流，应大于控制级触发电压和电流。

2）触发脉冲的上升前沿要陡，不要平缓上升，并要有一定的宽度，最好是矩形波，这样才能保证每次触发时间和阳极开通的准确。

3）触发脉冲应与主回路同步。

4）触发电路工作要稳定，特别是抗干扰能力要强。

3.5　晶体管式脉冲电源

晶体管脉冲电源是利用大功率晶体管作为开关元件而获得单向脉冲的。这类电源由于晶体管元件功率的限制，总输出功率一般均较小。但是由于它具有脉冲频率高，脉冲参数调节方便，脉冲波形较好，易于实现多回路控制和自适应控制等特点，故得到较为广泛的应用。特别是在 100 A 以下的中、小型脉冲电源中，采用多管并联输出的方式，可使输出加工电流达到线性可调。

无论哪种类型的晶体管脉冲电源一般都是由主振级、前置放大级、功率放大级及直流电源等部分组成，其最基本的原理方框图见图 2.5-82。

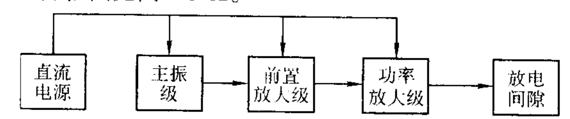


图 2.5-82　晶体管脉冲电源原理方框图

3.5.1 晶体管脉冲电源的主振级

主振部分为脉冲电源的主要组成部分，主振级（脉冲发生器）的作用是产生具有给定要求的脉冲波，如矩形高压脉冲波、矩形低压脉冲波、阶梯波、分组脉冲波等。所以脉冲电源主参数的调节，如脉冲宽度、脉冲间隔、分组脉冲个数等也由此级决定。

根据电火花加工工艺的特点，对主振部分电路要求振荡稳定，参数调节范围大，调节时各参数间相互牵制要小。

最早的晶体管电源是由分立元件组成的，所以脉冲发生器也是分立元件的，基本形式如图 2.5-83 所示。

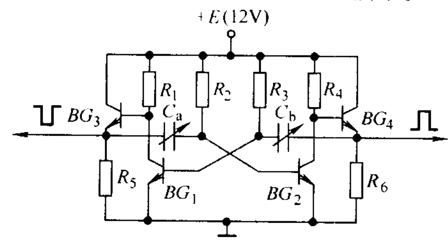


图 2.5-83　分立元件脉冲发生器

这是典型的晶体管多谐振荡器电路。晶体管 BG_1、BG_2 为振荡管，BG_3、BG_4 为射极输出管，当 BG_1、BG_4 导通时，强迫 BG_3、BG_2 截止。反之 BG_3、BG_2 导通时，强迫 BG_1、BG_4 截止。决定导通或截止的时间是由规准电容 C_a、C_b 分别放电或充电的时间决定的，此时在振荡管的集电极上就有矩形波输出 。由于 C_a、C_b 充电是通过射极输出管来完成的，这就使充电时间常数大大缩小，所以该线路基本上能满足高频率加工工艺的要求。

由于上述主振级都是由分立元件组成的。所以这种电路的缺点是：可靠性较差，参数必须分挡调节。

随着高稳定性、高性能的集成电路的问世，集成芯片取代了原有的主振电路，有效地提高了主振电路的稳定性、可靠性。图 2.5-84 是使用 NE555 时基电路芯片组成的主振电路。

该电路通过改变电容和电阻的组合，可以产生 2～1 000 μs 的脉宽或脉间。它的特点是：克服了上述电路存在的可靠性差的缺点，减小了电路的体积。

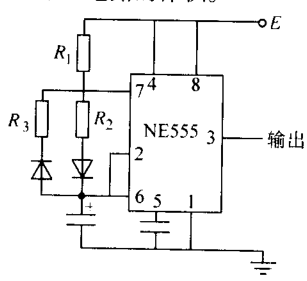


图 2.5-84　时基电路芯片组成的主振电路

近几年随着计算机技术的进步，又出现了使用 CTC（计时）电路、以及晶振元件与 CPU 组合成的数字化的主振电路，这类电路由微机来直接设置并改变脉冲宽度、脉冲间隔等主要芯片组成的主振电路参数，时间参数可无级调整，精确到 1 μs，甚至到 0.1 μs。还可以与加工参数的数据库相连，自动选择所需的加工规准参数。

3.5.2 晶体管脉冲电源的前置放大级

由于晶体管是电流驱动型的器件，需要有一定的功率来驱动它，而主振级输出的功率较小，远不够推动大功率管，故前置放大级的作用是将脉冲发生器（主振级）产生的脉冲信号放大到足够的幅度，用以推动功率放大级输出。

通常，前置放大级有以下两种形式。

1）脉冲反相器放大电路（图 2.5-85），其工作原理此处从略，但要注意，考虑到带负载的能力，可能需要多级驱动，各级均要满足饱和和截止条件以及波形的耦合。

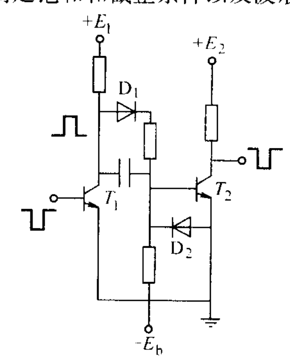


图 2.5-85　脉冲反相器放大电路

2）互补射级输出放大器电路（图 2.5-86），工作原理从略，此电路虽然复杂一些，但可靠性较反相器放大电路高。

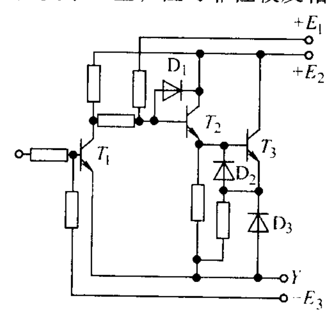


图 2.5-86　互补射级输出放大器电路

3.5.3 晶体管脉冲电源的功率放大级

（1）工作在开关状态的大功率晶体管亦即功率放大输出级

它在脉冲电源中起着向放电间隙输送脉冲能量的功能。它是通过调节输出功率管的数量来改变输出电流的峰值。一般采用共发射级耦合脉冲放大电路，即反向器式放大电路。

（2）单片机控制系统

由 8031 单片机、可编程计数器、可编程 I/O 并行接口、EPROM、E^2PROM、光电隔离等器件组成。主要功能如下。

1）组合输出加工所需的各种脉冲波形及时间常数，一般有：高压波形、低压波形、分组波形、阶梯波、脉冲频率、脉冲宽度、脉冲间隔等。

2）组合输出功率管选通个数的分配信号；可做到功率管数无需分挡、无级可调。

3）处理间隙检测反馈信号并输出拉弧保护信号。

4）EPROM 存储成套典型加工用参数；可以把不同加工材料的粗、中、精加工参数分组储存，用户调出即用。

5）E^2PROM 供用户随时存储自行选择的加工参数组。

6）系统与功率级的光电隔离处理等。

由单片机系统管理的触摸式操作面板及数码管显示通过可编程 I/O 接口与系统通讯，主要功能有：手动输入加工用参数并显示出来；调用系统中已存好的成套加工参数并显示出来。

（3）信号接口板

它主要是将功率管选通个数的分配信号以及脉冲波形信号调整相位并整形后，送至各个功率板。

（4）间隙检测部分

它检测放电间隙中放电维持电压的最低临界值，反馈至单片机系统，用以改变脉冲参数改善间隙状态和及时发出拉弧信号。

(5) 功率放大部分

功率放大级使用的主功率输出器件为 VMOS 场效应管。VMOS 管的特点如下：

1) 输入阻抗高。由于栅源之间是 SiO_2 层，所以栅源之间的直流电阻基本上就是 SiO_2 的绝缘电阻，一般为 $10^8\ \Omega$ 左右。由于交流阻抗取决于信号频率和输入电容，VMOS 管的输入电容随电流大小而不同，但比晶体管的输入电容小，所以交流输入阻抗高。

2) 所需驱动电流和驱动功率小。由于 VMOS 管的驱动电流实际上是 SiO_2 的漏电流，所以就很小，一般为 0.1 μA，驱动功率也很小，一般认为只要有电压就可驱动。

3) 开关速度快。VMOS 管的载流子是由电场控制的，开关时间基本上决定于寄生电容、电感，故开关速度快。

4) 通频带宽，高频特性好。由于 VMOS 管多数载流子运动为漂移运动，且漂移距离极短，所以 VMOS 管功率增益随频率变化极小。

图 2.5-87 为 VMOS 管功率级输出电路。由图可见：它由两部分组成。功率前级只需一只晶体管 T_1 驱动 VMOS 管。功率放大输出级中，D 为高、低压隔离二极管，R 为输出回路限流电阻，电容 C 起吸收 VMOS 管源级与漏级之间的反向尖峰电压，保护管子。

以上可见，此电源的结构比以前的脉冲电源要简单得多。而且电路的组成不管是控制电路，还是功率放大电路均简化许多，相应提高了可靠性。但是该电路比起现在的一些先进的脉冲电源功能上还有欠缺。如：功率级使用限流电阻，虽然放电稳定性较好，但相应电能利用率较低，能耗较大；单片机对间隙状态信号的处理功能还不够完善、自适应控制功能不强等。

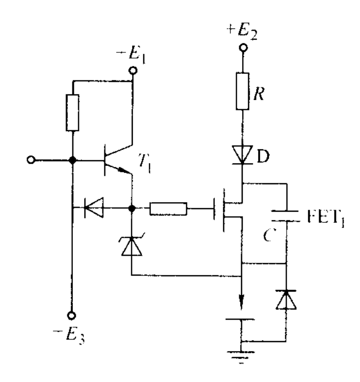


图 2.5-87 VMOS 管脉冲电源功率级输出电路

3.6 精密数控电火花成形机床的脉冲电源

目前数控电火花成形机床种类较多，其脉冲电源的的种类也较多，这里介绍一种数控电火花机床上使用的节能型电感限流脉冲电源。原理方框图如图 2.5-88 所示。

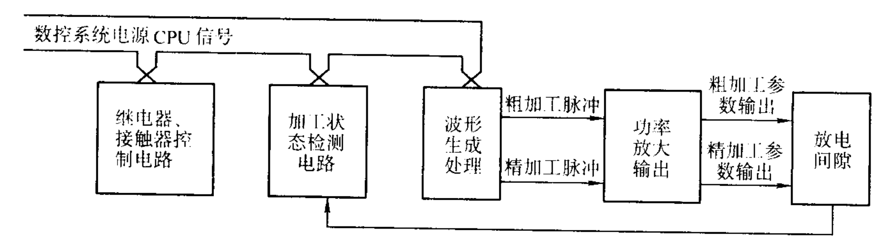


图 2.5-88 脉冲电源组成方框图

(1) 继电器、接触器控制电路

这部分电路主要控制的信号有：工作液泵起停，铃响起停，主放电开关，弱放电开关，极性切换控制，粗精加工板切换，高、低压切换控制，有损、低损加工切换等。这些控制信号均是由 NC 系统给出后，经固态继电器和晶体管无触点开关去驱动相应的继电器和接触器。

另有功率管温度检测指示、晶体管故障检测指示、过滤器工作状态指示、风扇故障指示、驱动回路用 12 V 电源指示、机床全停控制等也在这部分电路。

(2) 间隙状态检测电路

间隙状态的检测主要有三大目的：一是检测间隙状态用以控制伺服系统的进退动作；二是检测间隙状态是否有拉弧脉冲，以便报警停机；三是用以控制脉冲电源的参数。

为了实现以上三大目的，电路也分成三部分来处理。

1) 由电源 CPU 给出设定的伺服参考电压以及检测参考电压值，经处理后与间隙检测值进行比较，发给伺服系统上升或下降的信号，送回给 NC 系统。

2) 由电源 CPU 给出检测拉弧脉冲的设定代码，以及检测周期的时钟，检测到的信号主要送回电源 CPU 用于拉弧报警。

3) 检测电路检测出不同电压值，以区分正常脉冲及异常脉冲，并对电源 CPU 进行脉冲输出的控制。

(3) 脉冲波形生成及处理电路

这部分电路的作用是专门将来自数控系统电源 CPU 的加工参数波形处理成功率放大级所需的波形的电路，脉冲电源的波形生成过程如图 2.5-89 所示。图中选择信号 SSE、GE 和加工脉冲信号 G 是由 CPU 发出至波形处理电路的，G 是输入设定的加工参数值，SSE 和 GE 分别为精加工和粗加工的选通信号。B、C 点的波形即是波形处理电路经选通后输出给功率放大电路的信号，D、E 点波形是功率放大输出给加工间隙的信号。各点波形见图 2.5-90、图 2.5-91。

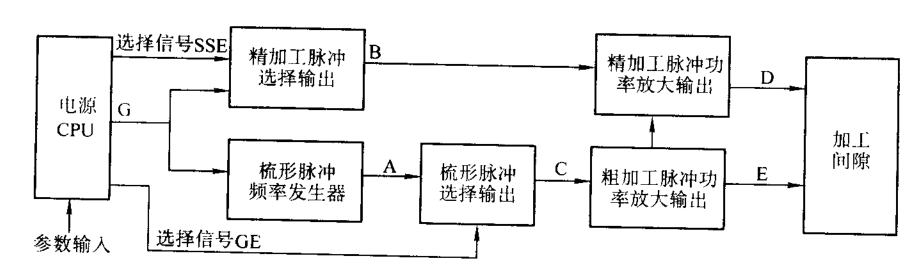


图 2.5-89 脉冲波形输出流程图



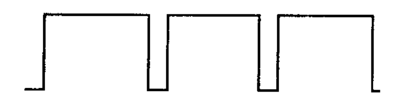


图 2.5-90　G、B、D 点电压脉冲波形

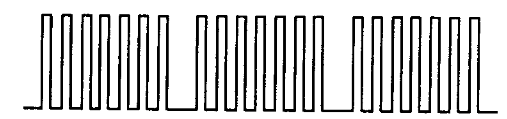


图 2.5-91　A、C、E 点电压脉冲波形（梳形波）

E 点的电压波形为梳形波，而电流波形由于功率放大电路中电感的作用，而实际输出为矩形波（如图 2.5-92）。

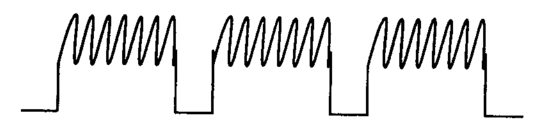


图 2.5-92　E 点电流脉冲波形

在这个脉冲电源中，最核心的技术就是使用梳形波来驱动功率级，此电路中梳形波是由专用脉宽调制电路芯片 494 对 G 点脉冲进行调制实现的。调制后的梳形波频率为 100 kHz。

脉冲的选择输出决定了选通的粗加工功率板数和精加工开关管数，即投入电流数。

（4）功率放大电路

功率放大电路由两部分组成：精加工放大电路和粗加工放大电路。两电路的切换在选参数时，NC 系统自动进行。

图 2.5-93 为粗加工放电主回路原理示意图。

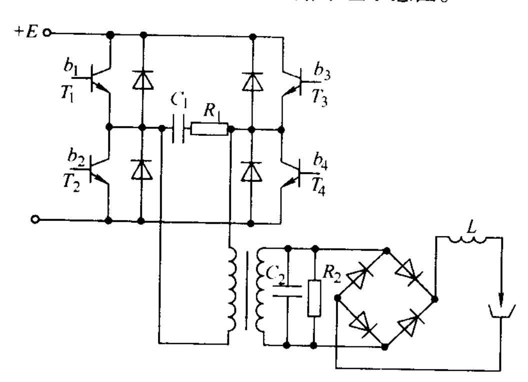


图 2.5-93　粗加工放电主回路原理示意图

这个脉冲电源最大输出电流为 50 A，总电流是由图 2.5-93 电路并联输出的，每个电路最大输出电流约 8 A。电路的最大特点如下。

1）功率放大电路的电源 E 为工频交流电整流后的直流电，没有大的电源变压器，减少了变压器的能耗和热量。

2）晶体管桥式电路放大，晶体管的基级 b_1 ~ b_4 是由小脉冲变压器输出驱动的。

3）桥式放大电路输出脉冲至脉冲变压器耦合信号。

4）电感限流输出，取代了传统的电阻限流方式，既减少了内部能耗，又控制了脉冲电流前迴沿的上升斜率，有效地减小了电极损耗。同时恒定加工电流可达到稳定加工的目的。

5）功率放大级输入的脉冲信号 b_1 ~ b_4 为频率较高的梳形波脉冲，经电感限流后，在间隙两端输出的电流波形被平滑连续成了矩形波（见图 2.5-92）。

6）此粗加工放大电路的输出，同时作为精加工功率放大回路的电源，为精加工功放回路供电。

图 2.5-94 为精加工功率级主回路原理示意图。

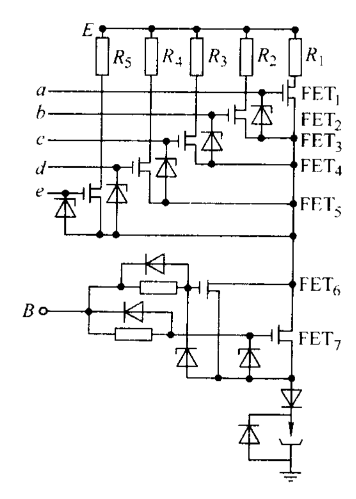


图 2.5-94　精加工功率级主回路原理示意图

该精加工放电主回路为电阻限流输出方式，但由于电源电压取自粗加工放大电路的空载输出电压，粗加工放大电路是电感限流，电流脉冲的前沿为前圆弧，故也能有效地降低电极的损耗。

精加工回路的最大输出电流约 9 A。当选择输出电流较小时，由于放电能量较小，使加工间隙变小，因此，在输出电流小于 4 A 时，电路自动串联一个 30 V 电源，使空载电压升高，以提高小能量加工时的稳定性，有利于提高加工表面粗糙度。

FET1 ~ 5 为选通电阻组合的开关管，选择使用多大的电流来加工，由电路中场效应管 FET1 ~ 5 的选通来决定，FET1 ~ 5 的栅极信号 a、b、c、d、e 是由电源 CPU 送出的。投入工作的电阻的不同组合，可使加工电流由 1.2 ~ 9 A 变化。场效应管 FET6、FET7 并联输出，为加工间隙输送脉冲功率，它们的并联栅级输入触发信号 B（见图 2.5-90）相似于所需的加工参数脉冲信号。

FET6、FET7 管的前级驱动为晶体管组成的推挽电路，也比较简单。

（5）硬质合金加工专用电路

前面所述的功率放大电路，稍加变化即可产生脉宽小于 1 μs、峰值电流可达几十安培的电流脉冲。可加工硬质合金或微细小孔。它的脉宽范围为 0.5 ~ 0.9 μs，最小峰值电流为 2 A，最大峰值电流为 56 A。

3.7　智能化脉冲电源及脉冲电源的发展趋势

由于计算机、集成电路技术、数控技术的发展，脉冲源正在不同程度地逐渐向数控化发展，数控化使得智能化脉冲电源有了很大的发展。智能化电源比起传统的脉冲电源有两大方面的突破：一是选取加工参数的智能优化；二是加工过程中的智能化控制。

1）选取加工参数的智能优化，是建立在丰富、正确的加工工艺数据库基础上的。设计者将不同材料、不同加工面积等各种加工条件下，粗、中、精不同的加工工艺参数做成曲线表格，作为专家数据库，写入计算机的只读存储芯片中，作为脉冲电源的一个组成部分。使用者只需将加工对象的材料、加工面积、加工深度、加工目标值等要求条件输入系统，机床脉冲电源就可自动选好与之相对应的加工参数，并在加工中自动转换，直至加工完成。

2）加工过程的智能化控制，能不同程度地代替人工监控功能，实现自适应控制功能。它能根据某一给定目标（保证一定表面粗糙度下提高生产率）连续不断地检测放电加工状态，并与最佳模型（数学模型或经验模型）进行比较运

算，然后按其计算结果控制有关参数，以获得最佳加工效果。当工件和工具材料，粗、中、精不同的加工规准，工作液的污染程度与排屑条件，加工深度及加工面积等条件变化时，自适应控制系统都能自动地、连续不断地调节有关加工参数，如脉冲间隔、进给量、抬刀参数等，以防止电弧放电，并达到生产率最高的最佳稳定放电的状态。

要实现脉冲电源的自适应控制，首要是电极间放电状态的识别与检测；其次是建立电火花加工过程的预报模型，找出被控量与控制信号之间的关系，即建立所谓的“评价函数”；然后根据系统的评价函数设计出控制环节。

由此可知，智能化脉冲电源已超出了一般脉冲电源的功能范围，实际上它已属于自动控制系统的范围。

近年来还出现了模糊（Fuzzy）控制、人工神经元网络模糊（NF）控制等智能化控制脉冲电源和控制系统，模仿熟练工人和专家的思维和操作过程对电火花加工中的脉冲电源和伺服进给等多种参数进行智能化的自动控制。

4 电火花加工用的伺服进给系统

4.1 概述

4.1.1 电火花加工伺服进给系统的工作原理及作用

电火花加工与切削加工不同，属于“非接触加工”。正常电火花加工时，工具和工件间有一放电间隙 S（严格而言，此处是指端面放电间隙 S_F），见图 2.5-95。S 过大，脉冲电压击不穿间隙介质，则不会产生火花放电，必须使工具电极向下进给，直到间隙介质被击穿，这时间 S 已很小（一般 $S=0.001\sim0.1$mm，与加工参数有关）。介质击穿后，工具电极又要跟踪放电蚀除金属的速度 v_W，维持放电间隙。当进给速度 v_d 较快，大于蚀除速度 v_W 时，间隙 S 变小，这时必须减小进给速度 v_d，以防止短路。一旦短路发生，则必须使工具电极反向快速回退，消除短路状态，以防止转化成电弧放电。随后再重新向下进给，调节到所需的放电间隙。这是进给系统维持正常放电的一个简单过程，但是由于火花放电间隙 S 很小，且它也与加工中的各种条件（如加工规准、加工面积、加工深度、工件材料等）均有关，因此很难靠人工来控制进给，也不能像钻削那样采用“机动”等速进给，而必须采用伺服进给系统，这种不等速的伺服进给系统也称之为自动进给调节系统。

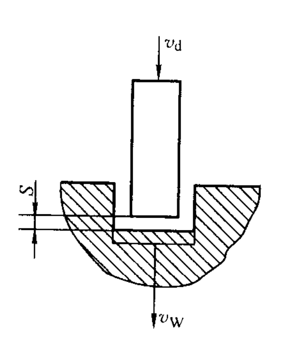


图 2.5-95 间隙、蚀除速度和进给速度

伺服进给系统是基于检测间隙放电状态来工作的，即按所检测到的状态来自动调整进给，其任务在于通过改变、调节进给速度，使进给速度接近并等于蚀除速度，以维持一定的“平均”放电间隙 S，保证电火花加工正常而稳定地进行，获得较好的加工效果。

以上过程也可通过图 2.5-96 的间隙蚀除特性曲线和进给调节特性曲线来说明：图中 I 为间隙蚀除特性曲线，横坐标为放电间隙 S 值或对应的放电间隙平均电压 $\bar{u}_e$，它与纵坐标的蚀除速度 v_W 有密切的关系。

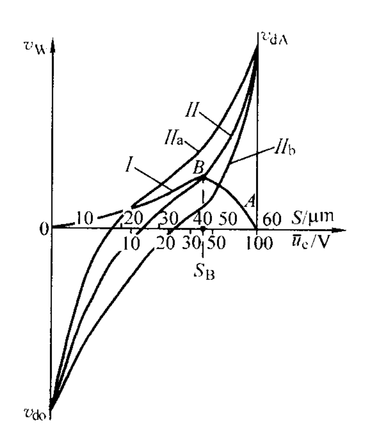


图 2.5-96 间隙蚀除特性曲线与进给调节特性曲线

当间隙太大时，例如在 A 点及 A 点之右，约 $S\geqslant60\ \mu$m 时，极间介质不易击穿，使火花放电率和蚀除速度 $v_W=0$，只有在 A 点之左，$S<60\ \mu$m 后，火花放电概率和蚀除速度 v_W 才逐渐增大。当间隙太小时，又因电蚀产物难于及时排除，火花放电率减小，短路率增加，蚀除速度也将明显下降。当间隙短路，即 $S=0$ 时，火花率和蚀除速度都为零。因此，必有一最佳放电间隙 S_B 对应于最大蚀除速度 B 点，图 2.5-96 中间隙 S 与蚀除速度 v_W 上凸的关系曲线 I，即间隙蚀除特性曲线。

粗、精加工采用的规准不同，间隙蚀除特性曲线也就不一样，S 和 v_W 的对应值也不同。例如精加工规准时，放电间隙 S 变小，最佳放电间隙 S_B 移向左边，最高点 B 移向左下方，曲线变低，成为另外一条间隙蚀除特性曲线，但趋势是大体相同的。

自动进给调节系统的近给调节特性曲线见图 2.5-96 中倾斜曲线 II，它是工具电极的进给速度随间隙大小而变化的关系曲线。左边的纵坐标为电极进给速度 v_W（左下的纵坐标为回退速度 v_{do}），横坐标仍为放电间隙 S 或对应的间隙平均电压 $\bar{u}_e$。当间隙过大，例如大于或等于 60 μm，为 A 点的开路电压时，工具电极将以较大的空载速度 v_{dA} 向工件进给。随着放电间隙减小和火花率的提高，向下进给速度 v_d 也逐渐减小，直至为零。当间隙短路 $S=0$ 时，工具将反向以 v_{do} 高速回退。理论上，希望调节特性曲线 II 相交于间隙蚀除特性曲线 I 的最高点 B 处。只有自动寻优系统、自适应控制系统，才能自动使曲线 II 交曲线 I 于最高点 B 或其附近，处于最佳放电状态。

理解上述间隙蚀除特性曲线和调节特性曲线的概念和工作状态，对合理选择加工规准、正确操作使用电火花机床，以及设计自动进给调节系统，都是很必要的。

4.1.2 电火花加工伺服进给系统的技术要求

由于工作原理的不同，加工方式的不同，电火花机床的伺服进给调节系统与金切机床的伺服系统有较大的区别，对系统的要求相应区别也较大，对电火花机床的伺服进给系统一般要求如下。

1）必须有一个准确、可靠的间隙工作状态检测环节。由于伺服进给系统是基于检测间隙放电状态来工作的，则加工间隙状态的准确评价和检测对整个系统的工作就至关重要。一般是用间隙检测后处理过的信号与系统设定的伺服参考电压信号进行比较。

2）有较广的速度调节跟踪范围。从特性曲线可见，自动进给调节装置应能满足粗、中、精加工的可调跟踪范围。



尤其是要有均匀的、平稳的低速性能，低速一般为1 mm/min以下。另外应使最大空载进给速度为加工进给速度 v_d 的5～15倍以上，以快速接近工件。而最大短路回退速度应为空载进给速度的2倍以上，以快速消除短路状态，适应加工的需要。

3）有足够的灵敏度和快速响应性。在速度跟踪过程中，由于放电的频率很高，加工间隙状态随机变化很快，要求跟踪系统有良好的快速响应特性，这就要有很高的反映灵敏度和足够的加速度。在不同的脉冲频率下，均能亦步亦趋的跟踪调节。为此，整个系统的不灵敏区、时间常数、运动部分的质量、惯性应小，丝杠、螺母和导轨都应既灵活，又无间隙，控制系统的放大倍数应足够。

4）有必要的稳定性和抗干扰能力。电蚀速度一般不高，加工进给量也不大，所以应有很好的低速性能，能均匀、稳定地进给，避免低速爬行，控制系统过渡过程应短，超调量要小。在速度控制中，要求有高的调速精度，强的抗负载扰动的能力。

为了满足上述要求，相应的系统执行元件——电动机也要具有高精度、快反应、宽调速、大扭矩等特性。具体的要求如下。

1）电动机从最低进给速度到最高进给速度范围内都能平滑地运转，转矩波动要小。

2）电动机必须具有较小的转动惯量和大的堵转转矩，尽可能小的机电时间常数和起动电压。

3）电动机应能承受频繁的启动、制动和反转。

4.1.3 伺服进给系统的分类

电加工机床的伺服进给系统种类较多。按位置控制方式分类，有开环控制系统、半闭环控制系统、闭环控制系统等。按信号形式分类，有数字式伺服系统，多用于精密数控机床的控制；有模拟式伺服系统，多用于一般控制电路中。如按驱动部件的动作原理分类，有电液控制系统和电气控制系统。全电气的伺服控制系统又有步进、直流和交流之分。

按目前在电火花机床上常用的伺服执行元件——电动机控制大致可分为以下几种。

1）步进电动机驱动控制　由于步进电动机制造容易，价格低廉，它所组成的开环进给驱动装置也比较简单易调，故广泛地应用在经济型数控机床上，特别是数控线切割机床上使用较多。它调速性能稍差，现在在中小型的电火花机床上用它作简易单轴数控。

2）宽调速直流伺服电动机驱动控制　大多数使用永磁式直流伺服电动机，低速性好，是目前我国电火花机床上使用最多的驱动方式。

3）交流伺服电动机驱动控制　国外电火花机床上已有较多使用，我国应用在不断增加，但有逐步取代直流伺服电动机的趋势。

4）直线电机驱动控制　是目前最为先进的驱动方式，国外电火花机床已有应用，我国电火花机床上还很少采用。

还有一些其他的驱动控制方式，如电液压伺服驱动、力矩电机伺服驱动等，以前在电火花机床上曾广泛使用，现在已停止生产了。

表2.5-16是目前电火花机床各种常用的伺服电动机的比较。

表2.5-16 电火花机床常用伺服电动机比较

比较内容	步进电动机	直流永磁电动机	交流永磁同步电动机	直线电机
电动机特点	1）结构最简单 2）可靠性高、不需维修	1）转子结构复杂 2）电刷与换向器需定期维修 3）转子转动惯量大	1）转子结构复杂 2）转子无电流，不发热，也不需维修 3）转子转动惯量小	1）速度快，加速度也大 2）时间常数小，响应快 3）结构复杂
伺服控制的方式	开环控制、最简单	闭环或半闭环控制	闭环或半闭环控制	闭环控制
伺服系统的性能	1）控制精度不高，受负载影响较大 2）高速性能差，低速调节的范围大	1）控制精度高 2）调速范围宽	1）控制精度高 2）调速范围宽 3）高速时弱磁控制比较难	1）控制精度高 2）调速范围宽 3）系统灵敏度高
构成伺服系统的成本	最低	较高	较高	高
适应环境	恶劣环境下能使用	防火、防爆的环境中不能使用	不受环境条件的限制	不受环境条件的限制
应用程度	较早应用，技术比较成熟	技术成熟，已广泛应用	控制技术已趋于成熟，有取代直流伺服的趋势	正在研究发展中

4.1.4 伺服进给系统的基本组成部分

电火花加工用的伺服进给系统是一个连续控制的位置随动系统，它与其他任何一个完善的调节装置一样，也是由调节对象、测量环节、比较环节、放大驱动环节、执行环节等几个主要环节组成。图2.5-97是其基本组成部分方框图，实际上根据机床所用驱动执行环节的不同，其组成环节的完善程度不同，可有增有减。

1）调节对象　电火花加工时的调节对象就是工具电极和工件电极之间的火花放电间隙。根据伺服参考电压 S_V 设定值等的要求，始终跟踪保持某一平均的火花放电间隙。

2）测量环节　目标是测量放电加工间隙的工作状态，并根据其来间接地反映放电加工间隙的大小。



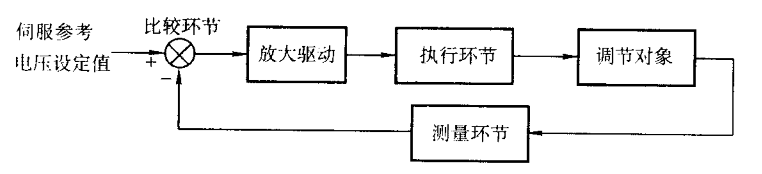


图 2.5-97 伺服进给系统的基本组成方框图

3）比较环节　比较环节用以根据"设定值"预置进给速度（实际上是伺服参考电压 S_V）或预置平均放电间隙来调节进给速度，以适应粗、中、精不同的加工规准。实质上是把从测量环节得来的信号和"给定值"的信号进行比较，在按此差值来控制加工过程。

4）放大驱动环节　由比较环节给出的信号一般都很小，难于驱动执行元件，必须要有一个放大环节，起到放大信号的作用。

5）执行环节　常用的执行元件有各种伺服电动机，它根据控制信号及时地调节进给量，随工件被蚀除量的大小，使电极不断跟踪而保持较佳的放电间隙，从而保证电火花加工正常进行。

4.2　伺服进给系统的放电间隙检测环节

在电火花加工中，间隙放电状态是伺服控制的依据，因此间隙放电状态检测的准确性至关重要。

在加工时，两个电极间放电状态的情况非常复杂，一般将放电时的工作状态分为：开路、火花放电、不稳定电弧放电、稳定电弧放电和短路等 5 种状态，见图 2.5-98。

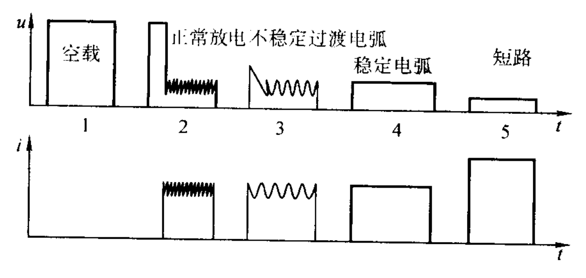


图 2.5-98　电火花加工中 5 种基本状态

1—开路空载；2—正常火花放电；3—不稳定电弧放电；4—稳定电弧放电；5—短路

这 5 种放电状态的特征分别如下。

1）开路　间隙加工介质未被电场击穿，脉冲电压波形为空载波形，电流为零。

2）正常火花放电　脉冲电压上有击穿延时，延时时间不等。击穿后放电期间，脉冲电压下降为放电维持电压，约为：25 ~ 30 V 左右，且电压波形上叠加有较密的高频分量，脉冲电流波形上也叠加有高频分量。

3）不稳定电弧放电　与正常火花放电相比，击穿延时时间明显很短，几乎没有。电压和电流脉冲叠加的高频分量较少，频率降低。这种状态如得到及时调整，可自动恢复为正常火花放电，否则将很快转化为稳定电弧放电。

4）稳定电弧放电　形成稳定电弧时，放电集中，电极局部温度很高。电压和电流波形光滑，没有高频分量，电压幅值与维持电压差不多，没有击穿延时。这种状态对电极和工件的破坏力很大。

5）短路　间隙很小或间隙短路，电压波形幅值很低，电流波形光滑，且幅值较高，已不能蚀除材料，但可造成电极和工件局部升温，易引发拉弧。

由上可见，了解各种状态的表现特征以及放电电压、电流波形，对准确的检测是很有用的。常用的检测方法有以下几种。

1）间隙平均电压检测法　这是最简单、最常用的一种间隙放电状态检测方法，如图 2.5-99。它通过 *RC* 电阻电容的低通滤波作用得到间隙电压的平均值，间隙平均电压的高低能大体反映间隙的放电状态。开路较多时，平均电压值偏高；短路较多时，平均电压值偏低；火花放电较多时，平均电压值处于中间区域。通过设置适当的门槛电压值（伺服参考电压），使平均电压与其进行比较，从而判定间隙的放电状态。

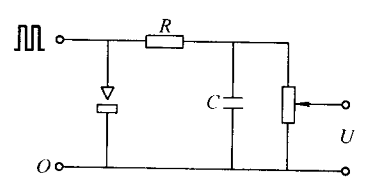


图 2.5-99　间隙平均电压检测电路

这种检测方法虽然不够精确，却简单实用，能满足一般加工的要求。由于实际加工中经常要调整脉冲宽度和脉冲间隔等参数，脉冲占空比的改变，会对间隙平均电压的大小产生影响，因此必须实时地调整伺服参考电压的值，才能较正确地反映间隙放电状态。而在使用微精加工参数时，由于脉冲宽度很窄，脉冲间隔很大，间隙平均电压的幅值变得极低，这种检测的准确性和可靠性将大为下降。这种检测方法多用于手动伺服调整的中、低档机床。

2）击穿电压检测法　图 2.5-100 为击穿电压检测电路。此电路检测的不是间隙平均电压值，而是提升为放电间隙击穿之前的空载电压值，检测电路中的电容 *C* 为信号存储电容，它充电快、放电慢，纪录峰值电压或击穿电压的大小；二极管 V_1 的作用是阻止负半波以及防止电容 *C* 所贮存的电压信号再向输入端倒流放掉；稳压管 V_2 选用 30 ~ 40 V 的稳压值，能阻止和滤除比其稳压值低的火花维持电压，从而突出空载峰值电压的控制作用，故此法又称为峰值电压检测法。这种方法用于需"欠跟踪的场合"，最好与其他检测方法相结合，才能对间隙状态作出较全面的判断。

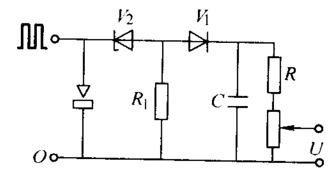


图 2.5-100　击穿电压检测法

3）击穿延时检测法　击穿延时检测法是根据图 2.5-98 中大量统计空载及正常火花放电时存在一定的击穿延时时间，而电弧放电和短路时一般没有击穿延时时间而设计的。

其检测方法见图 2.5-101，图中波形 1 为脉冲电源的主振脉冲信号，通常是将放电间隙检测到的脉冲信号（波形 2）与设定的门槛电压值（约 35 ~ 45 V）进行比较，取得电压幅值大于门槛电压的击穿延时脉冲（波形 3），这种脉冲是正常火花脉冲的延时或空载脉冲。用这组脉冲可去控制主轴的伺服进给下降动作。



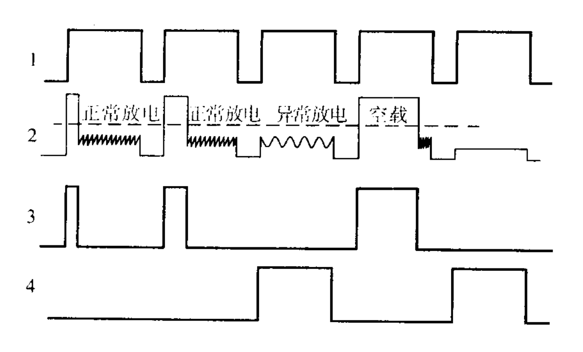


图 2.5-101 击穿延时检测法的脉冲分类

1—主振脉冲信号；2—间隙放电；3—击穿延时和空载脉冲；4—异常脉冲

通过数字电路的处理，同时可取得小于门槛电压值的脉冲（波形4），这组脉冲可定义为异常脉冲（短路、电弧脉冲），由于过渡电弧的维持时间极短，也是有一定危害性的脉冲，所以过渡电弧脉冲也归为了异常之列。用这组脉冲可去控制主轴的上升动作，或控制脉冲电源的参数调整。

使用主振级输出的脉冲信号（波形1）与以上两组脉冲（正常脉冲、异常脉冲）进行比较，通过计算机处理，可分别得到当前加工参数下的正常放电率和异常放电率。

这种检测方法其优点是对单个脉冲的放电状态进行判别，且检测电路为数字电路，抗干扰和稳定性都很好。并且可与计算机的控制系统直接连接后，将各种状态的脉冲组分析处理后，去分别控制所需对象。

过渡电弧放电和稳定电弧放电在极个别情况下，有时也会有击穿延时出现，这种检测法就不好区分了，最好同时采取其他方法检测区分，以求准确。

4）高频检测法　高频检测法是通过对间隙电压上高频分量的检测来区分火花放电与电弧放电。在火花放电时，间隙电压存在着强而稳定的高频分量（频率从几兆到几十兆），而电弧放电时，间隙电压的高频分量很弱，甚至不存在。因此可将间隙电压上的高频信号进行提取、放大、比较，作为区分火花放电和电弧放电的依据。这种方法还可以将电弧放电进一步区分为稳定电弧或是过渡电弧放电。

以上各种检测方法可分别或同时用于各种伺服控制系统中。

4.3 步进电动机伺服进给系统

20世纪80年代以来，步进电动机和力矩电动机的电-机械式自动伺服进给系统得到迅速发展。由于它们的低速性能好，可直接带动丝杠进退，因而传动链短、灵敏度高、体积小、结构简单，而且惯性小，有利于实现加工过程的自动控制和数字程序控制，因而在中、小型电火花机床中得到越来越广泛的应用。

4.3.1 步进电动机的工作原理

步进电动机是将电脉冲信号转换成相应角位移或线位移的机电式执行器。图 2.5-102 是三相反应式步进电动机的工作原理示意图。定子上有六个磁极，每个磁极上绕有控制绕组（图中未画出），接成三相绕组。转子是一个带齿的铁心，无绕组。当定子三相绕组按顺序轮流通电时，U、V和W三对磁极依次产生磁场，并吸引转子一步步地转动，每一步转过的角度称为步距角 α。若以 U→UV→V→VW→W→WU→U 方式顺序通电，即首先U相通电（见图 2.5-102a），转子齿1、3与U相磁极对齐，再使UV通电（见图 2.5-102b），转子齿被吸到与UV两相磁极的位置，转子逆时针方转过一个步距角；接着U相断电，只有V相通电，转子又逆时针转过一个步距角（见图 2.5-102c），转子齿4、2与V相磁极对齐；之后VW两相通电，转子齿被吸到与VW两相磁极的平衡位置，转子又逆时针转过一个步距角（见图 2.5-102d）；如此类推，每改变一次通电状态、步进电动机逆时针旋转一个步距角 α。经过六次状态变化之后，定子通电相又回到U相通电的初始状态，但转子逆时针旋转了一个齿距（见图 2.5-102g），转子齿2、4被吸引到与U相磁极对齐。定子绕组每完成一个通电循环，转子就转过一个齿距，定子绕组的通电如此周而复始，转子就逆时针方向不断旋转。当定子控制绕组经过 Z 倍（Z 为转子齿数）完整的通电循环后，转子恰好转过一周。一个通电循环内的通断电节拍数称为循环拍数，以 m 表示，其值等于定子控制绕组的相数或相数的倍数。依此，步进电动机的步距角 α 为

$$\alpha = \frac{360}{Zm} \qquad (2.5\text{-}5)$$

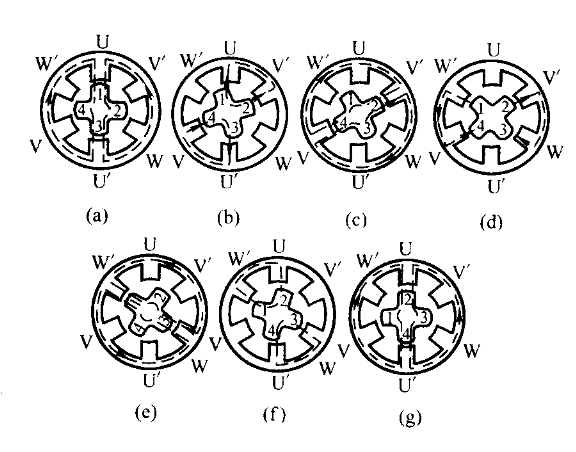


图 2.5-102 三相反应式步进电动机工作原理示意图

当外电路输入一个脉冲时，控制绕组的通电状态就改变一次，与此对应，步进电动机将转动一个步距角 α。因此，步进电动机转过的步距角数等于外加的脉冲数。所以步进电动机的平均转速

$$n = \frac{60f}{Zm} \qquad (2.5\text{-}6)$$

式中，f 为控制脉冲的重复频率，Hz；n 为步进电动机的平均速度，r/min。

步进电动机的平均转速还可以用步距角 α 乘脉冲频率 f 来表示

$$n = \frac{f}{6}\alpha \qquad (2.5\text{-}7)$$

由以上两式可见，步进电动机的平均转速 n 与 f 和 α 成正比，即步进电动机的转速取决于外加控制脉冲的重复频率 f。改变控制脉冲的频率，即可改变步进电动机的转速，很方便地实现无级调速。同时，只要改变通电状态的顺序，就可以实现步进电动机的逆转。由于步进电动机具有这些特性，在伺服系统中，它能够按照控制指令，实现启动、停止、加速、减速、正反转及记忆位置等操作。

4.3.2 步进电动机的伺服进给系统原理框图

图 2.5-103 是步进电动机伺服进给系统的原理框图。检测线路对放电间隙进行检测后，输出一个反映间隙大小的电压信号。变频电路为一电压-频率（$V-f$）转换器，将该电压信号放大并转换成不同频率的脉冲串，送至进给与门1准备为环形分配器提供进给触发脉冲。同时，多谐振荡器发出恒频率的回退触发脉冲，送至回退与门2准备为环形分配器提供回退触发脉冲，根据放电间隙平均电压的大小，两种触发脉冲由判别电路通过双稳电路选其一种送至环形分配器，决定进给或者回退。当极间放电状态正常时，判别电路通过双稳电路打开进给与门1；当极间放电状态异常（短路

或形成有害的电弧）时，则判别电路通过双稳电路打开回退与门2，分别驱动环形分配器正向或反向的相序，使步进电动机正向或反向转动，使主轴进给或退回。

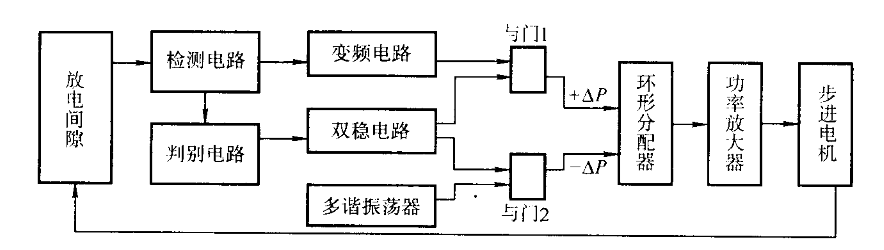


图 2.5-103　步进电动机伺服进给系统原理框图

在步进电动机自动调节系统中，应注意脉冲当量（步矩）的选择。脉冲当量是输入一个脉冲信号时，步进电动机转动一“步”时主轴的位移量。它的大小与电火花加工工艺密切有关，脉冲当量太大，常会短路，使加工稳定性和加工速度明显降低；脉冲当量太小，又会影响主轴的进给和回退速度，特别是在放电间隙发生短路或有害电弧时，使电极来不及加速回退而导致电极与工件的烧伤。

随着数控技术的发展，国内外的高档电火花加工机床均采用了高性能直流或交流伺服电动机，并采用直接拖动丝杠的传动方式，再配以光电脉冲编码器、光栅尺、磁尺等作为位置检测环节，因而大大提高了机床的进给精度、性能和自动化程度。

4.4　直流伺服电动机自动伺服进给调节系统

直流电动机具有良好的调速特性，因此，在对电机的调速性能和起动性能要求较高的生产机械上，以往大都采用直流电动机驱动。近年来，在我国大多数的电火花机床上，尤其是精密数控电火花机床上都采用永磁直流伺服电动机来驱动运动轴。因为永磁直流伺服电动机有宽的调速范围，所以也叫做宽调速直流电动机。

4.4.1　永磁直流伺服电动机的结构及工作性能

永磁直流电动机的结构如图 2.5-104 所示。电机本体由三部分组成：机壳、定子磁极和转子电枢。反馈用的部件一般与本体做成一体，安装在电机的尾部，如：测速发电机、旋转变压器以及脉冲编码器等。以目前大多数单轴数控电火花机床上使用的 M818－T31 直流伺服电机为例，它的尾部装有测速发电机作速度反馈元件用。在三轴数控电火花机床的三个进给轴电机尾部，一般装有脉冲编码器，作位置反馈和速度反馈用。

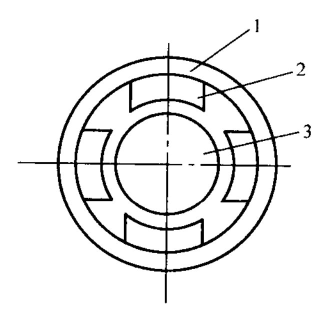


图 2.5-104　永磁直流电动机的结构
1—机壳；2—定子磁极；3—转子电枢

永磁直流伺服电动机的定子磁极是一个永磁体，磁极的形状多为瓦状结构（也有矩形的）。转子电枢多采用普通型的有槽电枢，电枢铁心上的槽数较多，采用斜槽，且在一个槽内分布了几个虚槽，以减小转矩的波动。

永磁直流伺服电动机的性能，可用特性曲线和数据表来说明。

1）转矩－速度特性曲线（又叫工作曲线）　以 M818 直流伺服电动机为例，如图 2.5-105。图中有三个工作区域，a 区域为连续工作区域，在该区域内可对转矩和转速做任意组合，都可长期连续工作。b 区域为断续工作区域。c 区域为加速和减速区域。

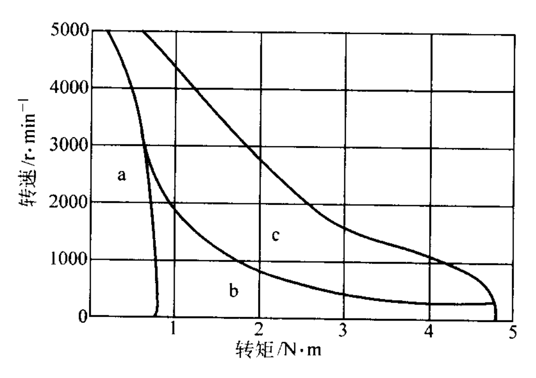


图 2.5-105　M818 直流伺服电动机工作曲线
a—连续工作区；b—断续工作区；c—加、减速区

2）电动机数据表。以电火花机床常用的 M818－T031 直流伺服电动机为例（见表 2.5-17）。

表 2.5-17　电动机数据表

参数	符号	单位	数值
额定输出功率	P_R	W	180
额定供电电压	E_R	V	48
额定转矩	T_R	N·cm	60
额定供电电流	I_R	A	5.3
额定转速	N_R	r/min	3 000
连续堵转转矩	T_S	N·cm	63
峰值最大转矩	T_{PS}	N·cm	480
最大峰值电流	I_P	A	40
最大转速	N_{max}	r/min	5 000
静摩擦转矩	T_F	N·cm	0.44
峰值加速度	a_{PS}	rad/s^2	21×10^3
转矩常数	K_T	N·cm/A	13.8
电压常数	K_E	V·min/kr	14.2
转动惯量	J_M	$N\cdot s^2$	2.3×10^{-3}
电枢电阻	R_a	Ω	0.9
电感	La	mH	3
机械时间常数	t_m	ms	12
电气时间常数	t_e	ms	3.2
温度时间常数	t_{th}	min	30

3）测速发电机数据表（M818－T031）　见表 2.5-18。



表 2.5-18 测速发电机数据表

参数	符号	单位	数值	参数	符号	单位	数值
电压斜率	K_{EG}	V·min/kr	7^{+2}_{0}	电感	L_1	mH	5.3
纹波（峰-峰）	V_{ms}	%	3	最小负载电阻	R_L	kΩ	10
线性度	Δ	%	1	转动惯量	J_M	N·cm·s²	1.2×10^{-3}
电枢电阻	r_1	Ω	40				

4.4.2 直流伺服电动机的伺服进给控制系统

常见的直流伺服进给自动调节系统的原理框图见图 2.5-106。

这是一种较为常见的、脉宽调制式直流伺服调节系统，其检测环节为放电加工间隙状态的检测电路。

1）比较环节　由比较放大器组成，经检测环节处理输出的、能间接反映间隙状态的电压值与给定的伺服参考电压值在此进行比较并放大；其典型电路如图 2.5-107 所示。

2）PI（比例－积分）调节器　是为了获得满意的静态和动态的调速特性，并对速度信号进行放大。

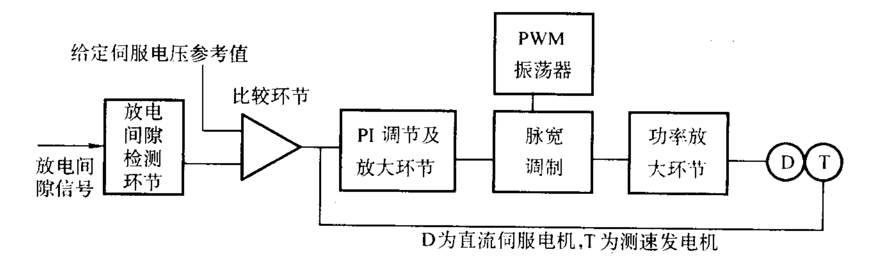


图 2.5-106 直流伺服进给自动调节系统原理框图

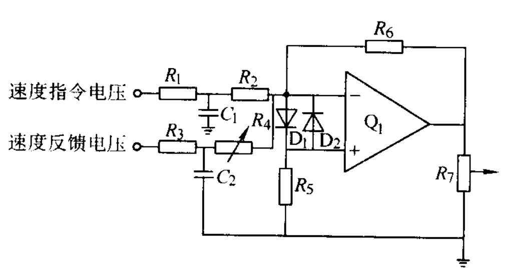


图 2.5-107 比较放大器

图 2.5-108a 是 PI 调节器典型电路。当在速度调节器的输入端，突加给定电压 u_1 时，由于电容 C 两端电压不能突变，故在开始瞬间电容 C 两端相当于短路，亦即在反馈回路中只有电阻 R_3 起作用。此时，相当于放大倍数为 $K_P=R_3/R_1$ 的比例调节器，将在输出端立即呈现 $u_{2(0)}=K_P u_1$，所以立即起调节作用。同时，由于负反馈很强，使放大器的放大倍数下降，从而又使调节过程变得缓慢而稳定。此后，随着电容 C 被充电，反馈电压减小，所以它的放大倍数又逐渐增大。因此 u_2 也逐渐增加。最后，电容 C 被充电到最高电压 $K_0 u_1$（其中 K_0 为运算放大器 Q_1 的开环放大倍数）。输出电压 u_2 按指数曲线变化，和输入信号保持近似的比例——积分关系。如图 2.5-108b 所示的那样。在稳态时，电容 C 相当于开路，放大器不再有负反馈，极大的开环放大倍数使系统基本达到无静差，以保证有足够高的控制精度。可见，PI 调节器相当于一个放大倍数可以自动调节的放大器，动态时放大倍数低而静态时放大倍数高。因而合理地解决了速度调节系统的稳定性与精度之间的矛盾。

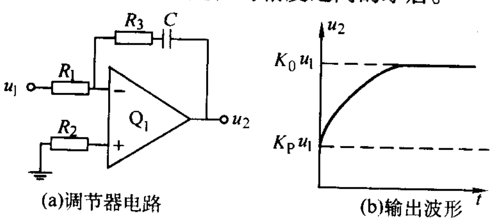


图 2.5-108 PI 调节器

在伺服调速控制系统中，采用了脉宽调制（PWM）式的电路，其原理是利用脉宽调制器对大功率开关放大器的开关时间进行控制，将直流电压转换成某一频率的方波电压，加到直流电机的电枢两端，通过对方波脉冲宽度（占空比）的控制，改变电枢两端的平均电压，从而达到调节电机转速的目的。一般常用的 PWM 振荡器（调制信号发生器）都是采用三角波或锯齿波发生器通过电压比较器来调节脉宽占空比的。

3）功率放大环节　常使用 H 型双极性开关放大电路，典型电路图如图 2.5-109 所示。

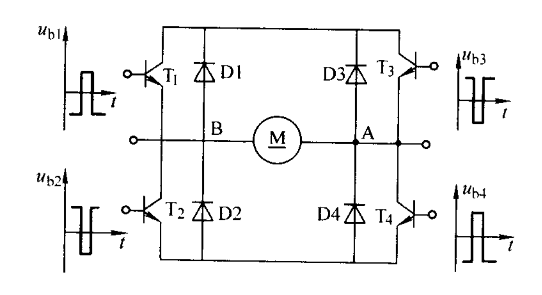


图 2.5-109 H 型双极性开关放大电路

在图 2.5-109 中的控制电压的特点是 $u_{b1}=u_{b4}$，$u_{b2}=-u_{b1}$。当在 $0\leqslant t<t_1$ 的时间区间内，T_1 和 T_4 导通，$+E_d$ 加在电枢的 AB 两端（即 $u_{AB}=+E_d$），而在 $t_1\leqslant t<T$ 的时间区间内，T_2 和 T_3 导通，此时电源 $+E_d$ 加在 BA 两端（即 $u_{AB}=-E_d$。而当调制器输出的脉宽 $t>T/2$ 时，电枢两端平均电压大于零，电机正转。反之，当 $t_1<T/2$ 时，平均电压小于零，电机反转。当 $t_1=T/2$ 时，平均电压等于零，电机转速为零。

4.5 交流伺服电动机伺服进给调节系统

交流伺服电动机在数控机床上的应用已较为普及，已在逐步取代直流伺服电动机。交流伺服电动机的种类很多，电火花机床上常用的交流伺服电动机为永磁式交流同步伺服电动机，许多国家已将这种交流伺服电动机的伺服进给系统较多地应用于精密数控电火花机床上。在我国交流伺服电动机驱动用于电火花机床还为数不多，还正在发展之中。

4.5.1 交流伺服电动机的结构特点与工作原理

永磁交流伺服电动机由定子、转子和检测元件三部分组

成。定子具有齿槽，内有三相绕组，形状与普通感应电机的定子相同，但其外形考虑散热良好，有的呈多边形，且无外壳。转子由多块永磁铁和冲片组成。这种结构的优点是气隙磁密度较高，极数较多。转子结构中还有一类是有极靴的星形转子，采用矩形磁铁或整体星形磁铁。图 2.5-110，图 2.5-111 为永磁交流伺服电动机结构示意图。

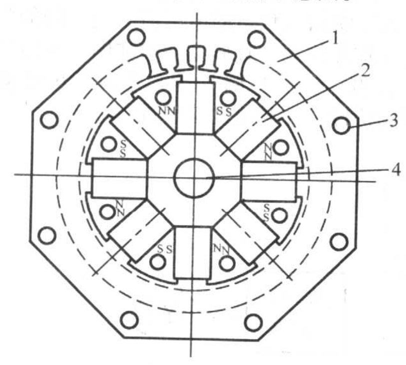


图 2.5-110　永磁交流伺服电动机横剖面图
1—定子；2—永久磁铁；3—轴向通风孔；4—转轴盒

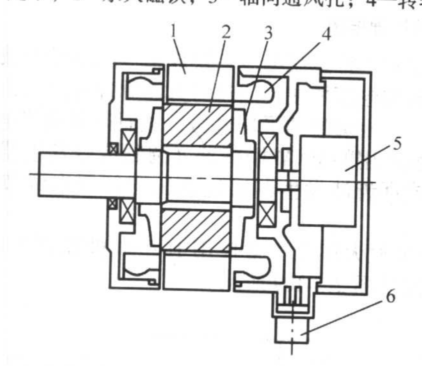


图 2.5-111　永磁交流伺服电动机纵剖面图
1—定子；2—转子；3—压板；4—定子三相绕组；5—脉冲编码器；6—出线

交流伺服电动机的结构有以下特点。

1）用了全封闭无刷构造，以适应恶劣环境，不需要定期检查和维修，具有充分的可靠性。

2）定子省去了铸件壳体，结构紧凑、外形小、重量轻（只有同类直流伺服电动机的 75%～90%）。

3）定子铁心较一般电机开槽多且深，线圈绕在定子铁心上，绝缘可靠，磁场均匀。并可对定子铁心直接冷却，散热效果好，因而传给机构部分的热传导小，提高了整个系统的可靠性。

4）转子采用具有精密磁极形状的永久磁铁，因而可实现高转矩/惯量（M/J）比，动态响应特性好，运行平稳。

5）同轴可安装有高精度的脉冲编码器或测速电机或感应同步器作检测元件。

6）交流电动机的过载能力和最高转速比直流伺服电动机高。

永磁式交流同步伺服电动机的工作原理很简单：当定子三相绕组通上交流电后，就产生一个旋转磁场，该旋转磁场以同步转速 n_s 旋转。根据磁极的同性相斥，异性相吸的原理，定子旋转磁极就要与转子的永久磁场磁极互相吸引住，并带着转子一起旋转。因此，转子也将以同步转速 n_s 与定子旋转磁场一起旋转。当转子轴上加有负载转矩之后，将造成定子磁场轴线与转子磁场轴线不一致（不重合），相差一个 θ 角，负载转矩变化，θ 角也变化。只要不超过一定界限，转子仍然跟定子以同步转速旋转。

设转子转速为 n_r（r/min），则

$$n_r = n_s = 60fp$$

式中，f 为电源交流电频率，Hz；p 为转子磁极对数。

4.5.2　交流伺服电动机伺服进给控制系统举例

其原理框图与直流系统相似，控制系统是由放电间隙检测及处理环节、比较环节、调速环节、矢量控制及坐标变换环节、PWM 变频调制环节、速度及位置反馈环节、脉冲放大环节等组成。图 2.5-112 是一种最简单又最适用的交流永磁同步电动机伺服控制系统的基本框图。

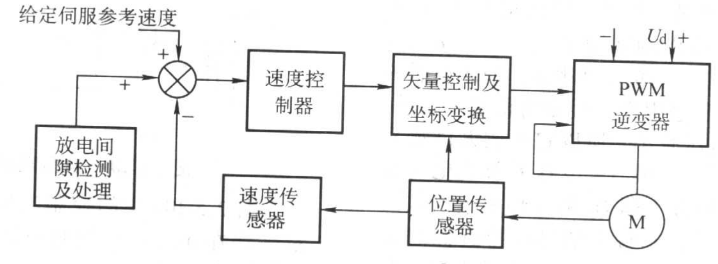


图 2.5-112　交流电动机伺服系统的基本框图

此图与直流伺服系统比较，不同之处在于指令电流要经过从直流至交流的坐标交换。

4.6　直线电动机自动进给调节系统

4.6.1　直线电动机的结构与动作原理

直线电动机又称作直线同步电机，就是把旋转结构的交流伺服电动机展成为平面直线型的电动机。原理上它是由一系列安装在主轴头滑板上的永久磁铁（动子）与环绕在硅钢片铁心的线圈套筒（定子）组成，当电枢线圈接通电流时，利用偏转 90°磁场与永久磁铁磁场相互作用产生的电磁推力来推动主轴上、下移动，推力的大小由电流（磁场）决定的。图 2.5-113 是直线电动机主轴头结构的剖面示意图。

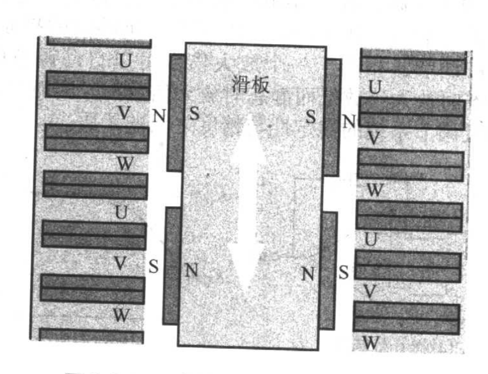


图 2.5-113　直线电动机主轴头的剖面图



图 2.5-114 是日本 SODICK 公司生产的直线电动机驱动主轴头的结构图，图中直线电动机的主轴头不仅是由瓷滑板（主轴）、电枢线圈、永久磁铁构成，同时还配有平衡气缸、冷却液管、制动器以及直线滚动导轨与检测位置信号的光栅尺等。

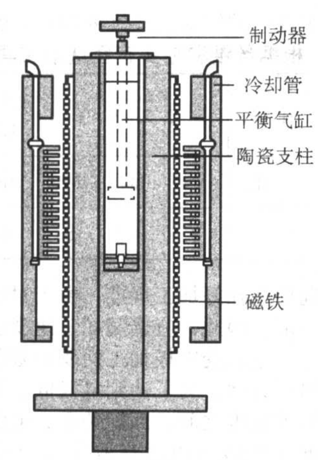


图 2.5-114　直线电动机主轴头结构

4.6.2　直线电动机驱动的技术特点

1）高速　采用直线伺服系统后，由于直接驱动，驱动源与运动部件之间不存在动力传递系统（滚珠丝杠、联轴器等），所以使得轴的运动速度大幅度提高，甚至可达上百米每分钟。实际应用中，日本沙迪克公司的电火花机床运动速度可达 36 m/min。

2）高加速度　最大加速度可达 1.2g。高速度和高加速度的实现在电火花加工中极大地改善了加工抬刀的性能，使得加工中能实现高加速抬刀，抬刀时间缩短，放电间隙的流体更新、排屑作用得到充分的改善。

3）高推力　由于从直线向直线转换能量，而且非接触（没有机构接触），所以能量损失极少，能增大高速驱动的推力。日本沙迪克公司的电火花机床输出最大推力可达 3 000 N。

4）高精度　由于不存在动力摩擦、接触传递系统，所以无传动间隙，能使失动量减小到极小限度。加之控制系统的最小驱动单位可达 0.1 μm，使得在精加工微进给也能稳定进行。

5）高速响应。由于失动量减小到了极小限度，所以能进行高响应（时间滞后极小）的动态运动。直线电动机的时间常数小于 1 ms，比起旋转电机的时间常数要小一个数量级。

编写：刘晋春（哈尔滨工业大学）
伏金娟（北京市电加工研究所）
邹丽芸（北京市机电研究所）
郭永丰（哈尔滨工业大学）
山昌祝（北京凝华实业有限公司）

第 6 章 电火花穿孔加工工艺

电火花穿孔加工工艺是指机床主轴只在垂直方向进给、加工表面是二维直壁等截面的加工工艺，加工出的形状，可以是圆孔、方孔或各类型孔。穿孔加工是相对于型腔加工而言的，有时也把穿孔加工和型腔加工统称为成形加工。

电火花穿孔加工的应用范围归纳如下。

1）冲模（包括凸凹模及卸料板、固定板），例如各类硅钢片冲模。

2）粉末冶金模，例如各类铁淦氧和永磁体的粉末冶金冲模。

3）挤压模（型孔），例如铝型材的各类挤压模，以及各种拉丝模。

4）型孔零件。

5）小孔（ϕ0.1～0.3 mm 小圆孔和异形孔），例如喷丝板的各类小孔。

6）微孔（0.1 mm 以下的小孔），例如喷墨打印机的微小孔。

1 电火花简单穿孔、套料加工

1.1 打去断入工件中的钻头、丝锥

钻削小孔和用小丝锥攻丝时，由于刀具硬而脆、抗弯、抗扭强度低，往往被拆断在孔中。为了避免工件报废，可采用电火花加工方法打去断入工件中的钻头或丝锥。为此，首先要准备好电极，可选用纯铜杆或黄铜杆。这两种电级材料来源方便，机械加工也不困难，其中纯铜电极的损耗小，黄铜电极加工时损耗较大，但加工过程比较稳定。

电极直径应根据钻头或丝锥的尺寸来决定。对钻头、工具电极的直径 d'应大于钻头直径 d_0，小于钻头外径 d，如图 2.6-1a 所示。一般 d_0 约为 $1/5d$，故可取电极外径 $d' = (2/5 \sim 4/5)\ d$，以取 $3/5d$ 为最佳。对丝锥，电极的直径 d' 应大于丝锥的心部直径 d_0，小于攻丝前的预孔直径 d_1（或丝锥的内径 d），如图 2.6-1b 所示。通常，电极的直径 $d' = \frac{d_0 + d_1}{2}$ 为最佳值。

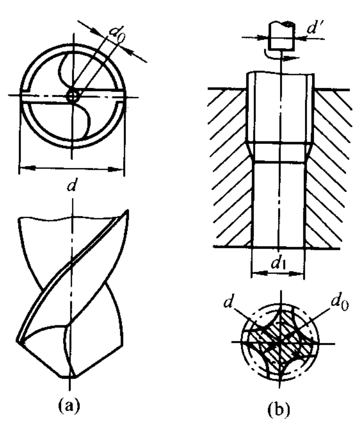


图 2.6-1 钻头和丝锥的有关尺寸

加工前，可以根据丝锥规格和钻头的直径按表 2.6-1 来选择电极的直径。在机床主轴头的电极夹头中，使用直角尺在 X、Y 两个方向上调整到电极与机床工作台面垂直，然后将工件安装在电火花机床的工作台面上，使折断的钻头或丝锥的中心线与机床工作台面保持垂直，再移动工作台，使电极中心与断入工件中的钻头或丝锥的中心一致。

表 2.6-1 根据丝锥和钻头直径选取工具电极直径

工具电极直径/mm	1～1.5	1.5～2	2～3	3～4	3.5～4.5	4～6	6～8
丝锥规格	M2	M3	M4	M5	M6	M8	M10
钻头直径/mm	2	3	4	5	6	8	10

开动机床前要选择好加工规准。由于对加工精度和表面粗糙度的要求一般，因此，应选用加工速度快、电极损耗小的粗规准。但加工电流受电极加工面积的限制，电流过大容易造成拉弧；另一方面，为了达到电极低损耗的目的，要注意峰值电流和脉冲宽度之间的匹配关系，电流过大，会增加电极的损耗。脉冲宽度可以适当取大些，并采用负极性加工。停歇时间要和脉冲宽度匹配合理。对晶体管电源，可参考表 2.6-2 的规准。

表 2.6-2 低损耗粗规准

脉冲宽度/μs	脉冲间隔/μs	峰值电流/A
150～300	30～60	5～10

上述工作完成后，可开动机床。首先开动工作液泵，使工作液充满工作液槽并高出工件表面 30～50 mm，然后启动脉冲电源和伺服进给系统。加工深度由断入工件的钻头或丝锥的深度及工具电极的损耗量来决定。

如果攻丝孔是通孔，可采用下冲油；如果是直孔，则可采用侧冲油或不冲油，必要时可采用铜管作工具电极，使工作液从铜管中导入加工区，即采用上部冲油进行加工。

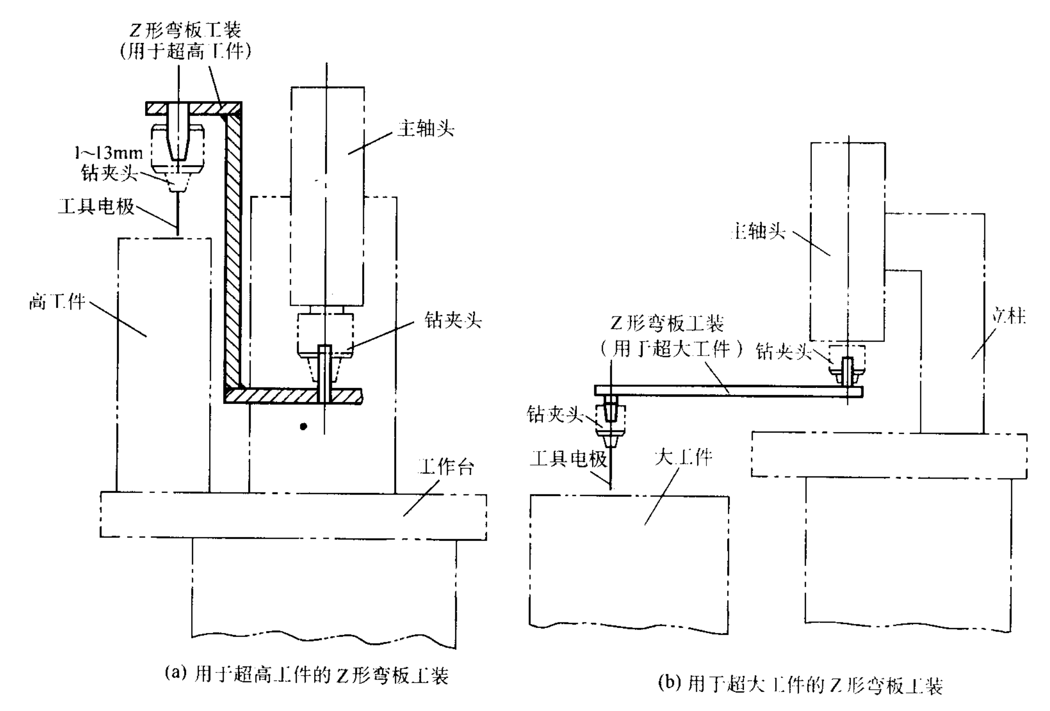
打去断钻头，丝锥也可在筒式机床上用 RC 线路电源进行。根据电极直径的大小，短路电流可以取 5～10 A，其余操作过程同前。

对于一些断在超高工件中的钻头或丝锥，主轴开挡行程高度不够，可做如图 2.6-2a 所示的 Z 形弯板工装装夹工具电极，超高工件固定在工作台上，冲油加工，注意安全。对于一些超大工件无法放到油槽里，可放在机床旁边，做如图 2.6-2b 所示的悬臂式工装，装夹电极进行冲油加工。

1.2 电火花套料加工

图 2.6-3 为用电火花在硬质合金坯件上套孔下料。电火花套孔用紫铜电极时损耗较小，电蚀生产率较高。筒壁厚约取 1 mm。壁太薄、工件蚀除量虽可减小，但加工条件并不好，长度损耗大，总生产效率反而不高。壁太厚，也影响生产效率。为提高效率，可把筒壁车成倒锥式（即筒口壁厚而筒底壁薄），以利排屑排气，并在圆筒上方开排气孔。若用平动头，筒壁就不需带倒锥，加工时始终使平动头工作，平动半径调整至 0.07～0.1 mm，可大大改善加工区域的排屑和排气条件，在通常坯件厚度范围内，可维持稳定的进给加工。需注意加工结束时工件中间圆环会直接下落，与工作台碰撞而使棱角崩裂。如图中所示，可在工作台油杯内部或直接在工件下方放置简单防护用托网架。有时加工结束时硬合金圆环底部并不是同时穿透，圆环下落时倾斜，把工具电极筒壁挤住，甚至形成短路。预防这类事件的办法是加工前在工件底面垫一块厚约 1 mm 的薄铁片。





(a) 用于超高工件的Z形弯板工装　　(b) 用于超大工件的Z形弯板工装

图 2.6-2　电火花去除超高和超大工件中的断丝锥、钻头

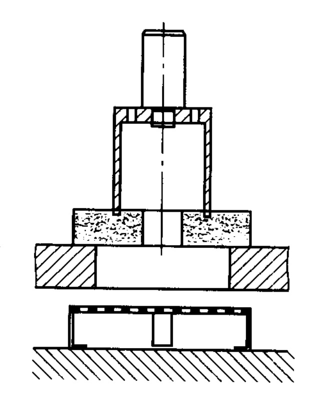


图 2.6-3　硬质合金坯件孔下料

1.3　电火花加工拉丝模

电火花穿孔广泛用于特殊材料如硬质合金和聚晶金刚石等的拉丝模加工。今以导电的聚晶金刚石拉丝模的加工为例。

1）工件名称　拉钢丝用的聚晶金刚石拉丝模。

2）工件尺寸　如图 2.6-4。

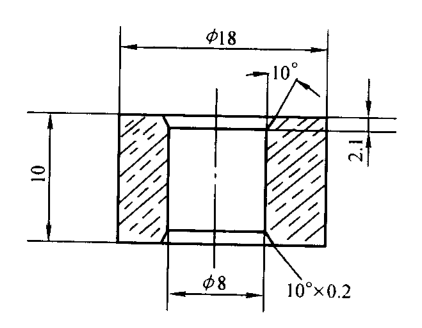


图 2.6-4　聚晶金刚石拉丝模主要尺寸

3）加工拉丝模前的工艺准备　需先按图 2.6-5 加工出模体和模盖，然后将件 2 聚晶金刚石块用粘结剂与件 1 模体粘合，件 3 模盖与件 1 模体采用过盈配合，压入件 1 后再在电火花机床上按前图 2.6-4 加工出拉丝模的内孔 ϕ8 和上端面上的进口锥面和下端面上的出口锥面（均为 10°）。

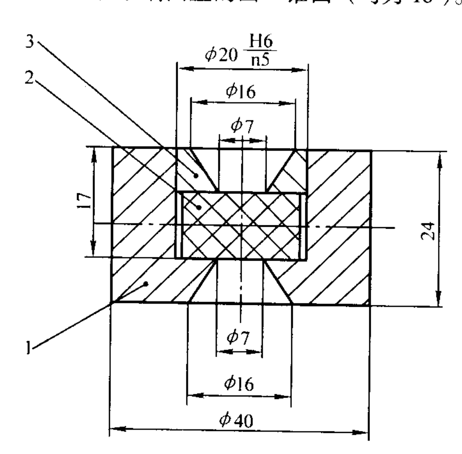


图 2.6-5　加工拉丝模用的工装

1—模体；2—聚晶金刚石模块；3—模盖

4）电极

① 应留出放电间隙及抛光余量，故加工 ϕ8 mm 内孔的电极采用 ϕ7.5 mm（ϕ8 mm 铜管冷拔而成）、壁厚 0.8 mm 的冷拔紫铜管（壁太薄损耗大，太厚加工慢）。

② 加工拉丝模正、反端面上锥孔的电极，采用 ϕ10 mm 端部带 10°锥度的纯铜棒。

5）加工用的附件

① 旋转工装，精度要求　垂直度 < 0.02 mm；径向跳动 < 0.03 mm。

② 上冲油装置。

6）工艺要求　负极性加工。穿孔时上冲油，加工锥孔时下冲油。

7）加工规准　如表 2.6-3，（使用疑华 NHT-1 型聚晶金刚石加工专用电源）出口锥孔稍微加工一下即可。

表 2.6-3　加工规准

加工	脉宽/μs	脉间/μs	峰值电流/A	伺服进给挡位	间隙电压/V	加工深度/mm
穿孔	12	100	17	快速 2	150	打穿 > 10
加工锥孔	12	100	7	快速 2	150	0.7
	12	100	7	快速 2	150	1.8
	4	100	3.5	快速 2	150	2
	2	100	3.5	快速 2	150	2.1

8）准备工作

① 装夹电极　将冷拔紫铜管夹入钻卡头，调整电极夹具上的调整螺钉，找好垂直度。

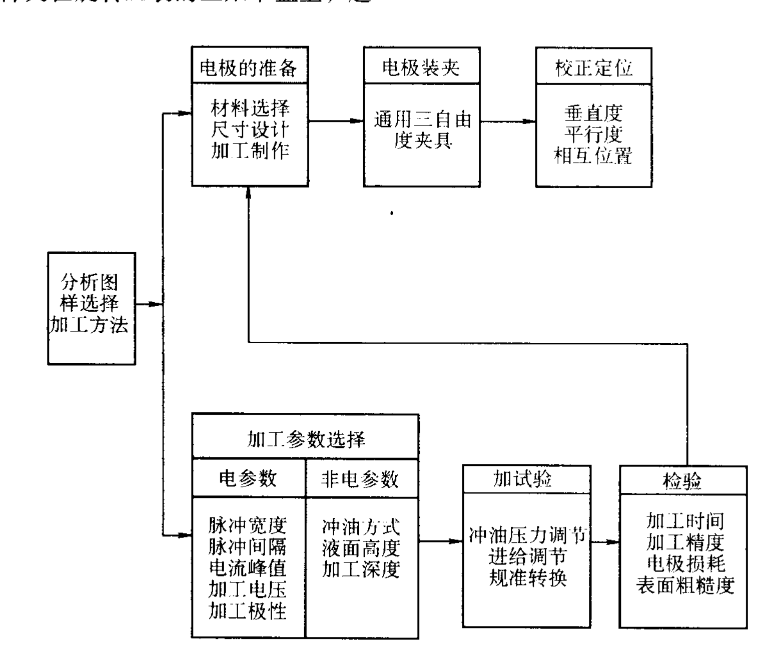
② 装夹工件　将工件夹在旋转工装的三爪卡盘上，起动旋转工装，打表，用铜棒轻轻敲击工件，将工件找正。

③ 对刀　按电源启动开关，将加工对刀开关扳向对刀，旋转伺服旋钮使主轴下降，当电极触到工件时，主轴呈跳动状态。稳定 X、Y 手柄，找准中心。深度百分表对零。

④ 加工　将加工对刀开关扳向加工，起动工作液泵，旋转工装和电极，待液面将浮子托起，将液面开关扳向下方。选择参数，按加工键。顺时针旋动伺服旋钮，使主轴下降，进行加工，调整冲油压力和伺服旋钮使加工稳定、快速。

1.4　电火花加工特殊型孔零件

某尖端产品中组件硬铝高频盒体上有 12 个异型孔，均为盲孔，深度为 10.80 ~ 13.02 mm，公差 ± 0.1 mm，累计误差不大于 12.3 mm，R 角不大于 1.0 mm，孔间薄壁最小 1.0 mm（宽 12.6 mm，深 12.3 mm）。常规切削加工难于实现内清角加工，薄壁容易变形。电火花穿孔加工可以有效地解决上述工艺难点。下面是在 NH7125ND 型电火花成形机上实现此零件加工的基本工艺路线。



1）图样分析（因图纸保密，这里只述其要点）　主体是各类方盲孔，尺寸公差要求不算高，但相对位置公差要求和累计误差要求综合实现就有一定难度。底角和内角半径小于 1.0 mm，电火花打孔是机加工最后一道工序，有大量的薄壁（1.0 mm）需要控制变形。整批零件加工需要有效控制电极损耗。综合加工效率和损耗要求，本案采用两个电极加工，分别确定粗加工和精加工规准及电极尺寸。

2）电极准备

① 材料选择　要求损耗小、尖角好加工。粗加工选用铜电极；精加工选用铜钨合金。

② 尺寸设计　粗设计一个电极做加工试验，对加工规准进行设定，加工试验完后检测端面抽耗如尖角损耗。如果都合格，再精确测量间隙值，需重复做 3 ~ 4 次，取平均值确定电极尺寸和加工深度设定值。留出 12 mm × 12 mm 基准面作找正用。本案粗加工电极单边留量 0.25 mm；精加工电极单边留量 0.08 mm。

③ 加工制作工具电极　因尺寸精度和形状误差要求较高，公差 0 ~ 0.015 mm（尺寸 5 ~ 16 mm；最大有效高度 25 mm）。数控铣床加工。

3）加工参数选择　先初选，根据加工结果进行修正。

① 电参数选择　粗加工结合加工效率、粗糙度和损耗要求综合考虑，脉冲宽度 150 μs；脉冲间隔 60 μs；电流根据不同面积选 6 ~ 12 A；电压用高低压复合，高压 200 V，低压 75 V；工件接（ - ），负极性加工。精加工选脉冲宽度32 μs，脉冲间隔 40 μs，电流 4 A。

② 非电参数　轻微侧冲油，使加工点附近工作液缓缓流动改善加工排屑条件。由于是小电流加工，液面略高于加工面即可。根据加工状态确定定时抬刀高度和周期。

③ 深度设定　需考虑电极损耗、加工间隙、对零误差等，试加工完要测量深度值进行校对。铜钨合金加工铝时，如果参数选择合适，则损耗可以不计，考虑间隙和对零因素，加工深度应比图纸标称值小 0.03 mm。

4）试加工　对于精密零件加工而言，需要通过试加工来确定电极尺寸、电参数、非电参数。

5）电极装夹　使用三自由度电极夹具（小角度旋转调整，X、Y 轴水平调整）。

6）校正定位　先小角度旋转调整电极与基准面平行，在调整 X、Y 方向水平时，注意每个孔加工都应以同一基准定位，以保证累计误差精度。为消除对零误差，对零接触面一定要擦试干净，不允许沾有液体或脏物，需要重复三次以上定位。

本案工艺作为定型工艺用于硬铝高频盒体异型孔加工。



电火花零件加工特点是需要反复加工试验，确定定型工艺，以保证零件精度。同一类机床固定加工参数加工出来的尺寸基本是一致的，但不同类机床固定加工参数加工出来的尺寸分散性可能很大，因此，在加工零件前需要通过加工试验确定电参数。

2　冲模电火花加工的要点

冲模是生产上应用较多的一种模具，由于形状复杂和尺寸精度要求高，所以它的制造已成为生产上的关键技术之一。特别是凹模，应用一般的机械加工是困难的，在某些情况下甚至不可能，而靠钳工加工则劳动量大，质量不易保证，还常因淬火变形而报废，采用电火花加工或线切割加工能较好地解决这些问题。冲模采用电火花加工工艺较机械加工工艺有如下优点。

1）可以在工件淬火后进行加工，避免了热处理变形的影响。

2）冲模的配合间隙均匀，刃口耐磨，提高了模具质量。

3）不受材料硬度的限制，可以加工硬质合金等冲模，扩大了模具材料的选用范围。

4）对于中、小型复杂的凹模，可以不用镶拼结合，而采用整体式，可以简化模具的结构，提高模具强度。

2.1　冲模电火花加工的基本工艺方法

凹模的尺寸精度主要靠工具电极来保证，因此，对工具电极的精度和表面精糙度都应有一定的要求。如凹模的尺寸为 L_2，工具电极相应的尺寸为 L_1（如图 2.6-6），单侧面火花间隙值为 S_L，则

$$L_2 = L_1 + 2S_L \qquad (2.6\text{-}1)$$

其中火花间隙值 S_L 主要决定于脉冲参数与机床的精度，只要加工规准选择恰当，保证加工的稳定性，火花间隙值 S_L 的误差就很小，因此，只要工具电极的尺寸精确，用它加工出的凹模也就比较精确。

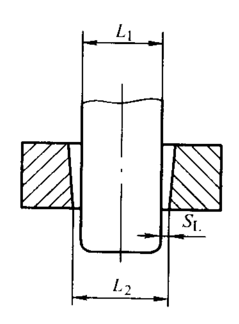


图 2.6-6　凹模的电火花加工

对冲模，配合间隙是一个很重要的质量指标，它的大小与均匀性都直接影响冲片的质量及模具的寿命，在加工中必须给予保证。

2.1.1　达到配合间隙的方法

电火花穿孔加工常用以下几种配合方法。

1）“钢打钢”、“反打正用”直接配合法　是直接用加长的上冲头钢凸模（可用线切割或成形磨削加工出此上冲头）作为电极直接加工凹模，加工时将凹模刃口端朝下形成向上的“喇叭口”，加工后将工件翻过来使“喇叭口”（此喇叭口正好符合刃口斜度，亦有利于冲模落斜）向下作为凹模，电极也倒过来把损耗部分切除或用低熔点合金浇固作为凸模，见图 2.6-7。

配合间隙靠调节脉冲参数、控制火花放电间隙来保证。这样，电火花加工后的凹模就可以不经任何修正而直接与凸模配合。这种方法具有配合间隙均匀、模具质量高、电极制造方便、钳工工作量少等优点。

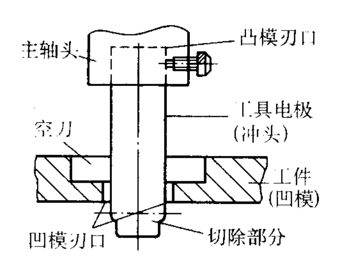


图 2.6-7　电火花穿孔成形加工直接配合法的示意图

但这种“钢打钢”时的工具电极和工件都是磁性材料，在直流分量的作用下易产生磁性，电蚀下来的金属屑可能被吸附在电极放电间隙的磁场中而形成不稳定的二次放电，使加工过程很不稳定。近年来由于采用了具有附加 300 V 高压击穿（高低压复合回路）的脉冲电源，情况有了很大改善。目前，电火花加工冲模时的单边配合间隙最小可达0.02 mm，甚至达到 0.01 mm，所以，对一般的冲模加工，采用控制电极尺寸和火花间隙的方法可以保证冲模配合间隙的要求，故直接配合法在生产中已得到广泛的应用。

2）间接配合法　适用于冷冲模具的加工。这种方法是将电火花性能良好的电极材料与冲头材料粘接在一起，共同线切割或磨削成形。然后，用电火花性能好的一端作为加工端，将工件反置固定，用“反打正用”的方法实行加工。这种方法可以充分发挥加工端材料好的电火花加工工艺性能，还可以达到与直接配合法相同的加工效果。

间接配合法的加工端材料可选用纯铜、铸铁或石墨。必须注意一定要粘接在冲头的非刃口端，才符合“反打正用”的加工原则，如图 2.6-8。

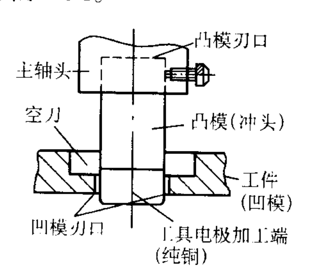


图 2.6-8　电火花穿孔成形加工间接配合法的示意图

3）阶梯工具电极加工法　在冷冲模具电火花成形加工中极为普遍。其应用方面有两种。

① 无预孔或加工余量较大时，可以将工具电极制作为阶梯状，将工具电极分为两段，即缩小了尺寸的粗加工段和保持凸模尺寸的精加工段。粗加工时，采用工具电极相对损耗小、加工速度高的规准加工，精加工段加工完成后只剩下较小的加工余量（见图 2.6-9a）。精加工段即凸模段，可以采用类似于直接成形法的方法实行加工，以达到凸凹模合的要求（见图 2.6-9b）。

② 在加工小间隙、无间隙的冷冲模具时，配合间隙小于最小的电火花加工放电间隙，用凸模作为精加工段是不能实现加工的，则可将凸模加长后加工或腐蚀成阶梯状，使阶梯的精加工段与凸模有均匀的尺寸差，通过加工规准对放电间隙尺寸控制，使之加工后符合凸凹模配合的技术要求（见图 2.6-9c）。

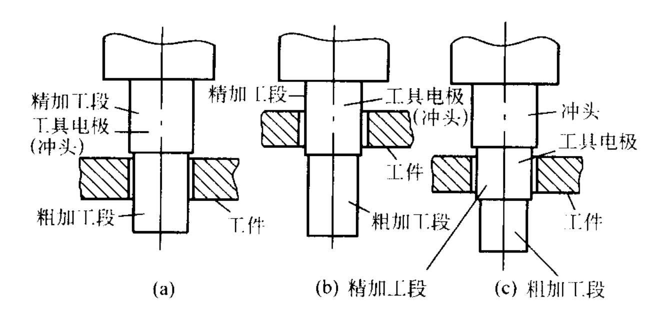


图 2.6-9　用阶梯工具电极加工冲模

除此以外，可根据模具或工件各种不同的尺寸特点和尺寸要求采用双阶梯、多阶梯工具电极。阶梯形的工具电极可以将直柄形的工具电极用“王水”酸洗、腐蚀而成（参见表 2.6-4）。

随着数控线切割加工机床性能和数控线切割编程技术的不断提高和完善，可以很方便地加工出任何配合间隙的冲模和落料板等，而且在有锥度切割功能的线切割机床上还可以切割出刃口斜度 β 和落料角 α。因此近年来绝大多数凸、凹冲模都已采用线切割加工。

2.1.2　工具电极

1）电极材料的选择　凸模一般选优质高碳钢 T8A、T10A、铬钢 Cr12、GCr15、硬质合金等。应注意：凸、凹模不可选用同一种钢材型号，否则电火花加工时就不易稳定。

2）电极的设计　由于凹模的精度主要决定于工具电极的精度，因而对它有较为严格的要求，要求工具电极的尺寸精度和表面精糙度比凹模高一级，一般精度不低于 IT7，表面精糙度 $R_a < 1.25\ \mu m$，且直线度、平面度和平行度在 100 mm长度上不大于 0.01 mm。

工具电极应有足够的长度，要考虑端部损耗后仍有足够的修光长度。

若加工硬质合金时，由于电极损耗较大，电极还应适当加长。

工具电极的截面轮廓尺寸除考虑配合间隙外，还要考虑比预定加工的型孔尺寸均匀地缩小一个加工时的火花放电间隙。

3）电极的制造　过去冲模电极的制造一般是先经普通机械加工，然后再成形磨削。一些不易磨削加工的材料，可在机械加工后，由钳工精修。目前，直接用电火花线切割加工电极已获得广泛的应用。

采用钢凸模淬火后直接作为电极加工钢凹模时，可用线切割或成形磨削磨出。如果凸凹模配合间隙超出电火花加工间隙范围，则作为电极的部分必须在此基础上增大或缩小。可采用化学侵蚀的办法作出一面台阶，均匀减小到尺寸要求，或采用镀铜、镀锌的办法扩大到要求的尺寸。

在加工冲模时，尤其是“钢打钢”加工冲模时，为了提高加工速度，常将电极工具的下端用化学腐蚀（酸洗）的方法均匀腐蚀去一定厚度，使电极工具成为阶梯形。这样，刚开始加工时可用较小的截面、较大的规准进行粗加工，等到大部分留量已被蚀除、型孔基本穿透，再用上部较大截面的电极工具进行精加工，保证所需的模具配合间隙。

阶梯部分的长度 l 一般为冲模刃口高度 h 的 1.2～2.4 倍，即 $l=(1.2\sim2.4)\,h$，阶梯电极的单边缩小量（单面蚀除厚度）Δ 可按下式计算

$$\Delta \geqslant \delta_{粗} - \delta_{精} + b$$

式中，$\delta_{粗}$ 为粗加工单面火花放电间隙，mm；$\delta_{精}$ 为精加工单面火花放电间隙，mm；b 为留给精加工的单面加工余量，$b = 0.02 \sim 0.04$ mm。

酸洗化学腐蚀液的配方见表 2.6-4。现以表中第 2 种腐蚀剂为例介绍配制过程及使用注意事项。

将水稍加热，加入氢氟酸、硝酸，搅拌均匀即可使用。

电极腐蚀前应先用四氯化碳清洗除油污，腐蚀时应不断搅拌腐蚀液，以提高腐蚀速度和减小锥度。如电极需要上粗下细的锥度，则在腐蚀过程中需多次把电极提出，提出的次数愈多，锥度愈大。腐蚀的时间应根据腐蚀速度和需腐蚀的厚度来确定，最好事先做些模拟实验，它和腐蚀液的温度和浓度有很大关系，一般应事先进行试验。腐蚀后的电极应用水清洗干净。

除用化学腐蚀法外，也可用电解法制造阶梯电极。

2.1.3　工件的准备

电火花加工前，工件（凹模）型孔部分要加工预孔，并留适当的电火花加工余量。余量的大小应能补偿电火花加工的定位、找正误差及机械加工误差。一般情况下，单边余量以 0.3～1.5 mm 为宜，并力求均匀。对形状复杂的型孔，余量要适当加工。

表 2.6-4　各种腐蚀剂配方及适用范围

腐蚀剂成分	配方种类									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	数量									
草酸	—	—	—	—	—	40 g	—	—	—	18%
硫酸	—	—	50%	17%	18%	—	—	—	—	2%
硝酸	100%	14%	50%	17%	10%	—	60 mL	80 mL	60 mL	—
盐酸	—	—	—	17%	10%	—	8 mL	30 mL	30 mL	—
磷酸	—	—	—	—	5%	—	2 mL	—	30 mL	—
氢氟酸	—	6%	—	—	2%	—	—	—	—	25%
双氧水	—	—	—	—	—	40 mL	—	—	—	55%
蒸馏水	—	—	—	—	—	10 mL	—	—	—	—
自来水	—	80%	—	49%	55%	—	—	—	—	—



续表 2.6-4

腐蚀剂成分	配方种类									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	数量									
腐蚀速度 /mm·min^{-1}	0.06	0.01	0.007 ~ 0.01	0.01	0.007 ~ 0.01	0.04 ~ 0.07	0.003 ~ 0.05	0.01 ~ 0.015	0.02 ~ 0.03	0.08 ~ 0.12
腐蚀后表面粗糙度	$R_a = 1.25 \sim 2.5\ \mu m$	$R_a = 1.25 \sim 2.5\ \mu m$	$R_a = 0.63 \sim 1.25\ \mu m$	$R_a = 1.25 \sim 2.5\ \mu m$	$R_a = 0.63 \sim 1.25\ \mu m$	接近原来表面粗糙度	$R_a = 0.63 \sim 1.25\ \mu m$	$R_a = 0.63 \sim 1.25\ \mu m$	$R_a = 0.63 \sim 1.25\ \mu m$	$R_a = 0.63 \sim 1.25\ \mu m$
适用对象	纯铜 黄铜	T8A Cr12	纯铜 黄铜	铸铁	钢（铜和铸铁也有良好效果）	钢、铸铁、铜均适用	工具钢 合金钢	工具钢 合金钢	工具钢 合金钢	最适宜于工具钢

注：1. 表中百分比（%）按体积计算；
2. 本表数据均指在不加热情况下所得。

2.1.4　工具电极工艺基准的校正

电火花穿孔加工中，主轴伺服进给方向一般都垂直于工作台，因此，工具电极的工艺基准必须平行于机床主轴头的垂直坐标。为达到目的，有如下方法。

1）加工制作工具电极时，电极柄定位面与工具电极使用同一工艺基准。这样，可以将电极柄直接固定在主轴头的定位元件上，从而使工具电极自然校正。主轴头的定位元件包括垂直 V 形体和自动定心夹头，可以定位圆柱电极柄。还有的主轴头定位元件是圆锥孔，可以定位锥柄工具电极。

2）无柄电极的水平定位面在加工制作时与工具电极的成形部位使用同一工艺基准。电火花成形机床的主轴头（或平动头）都有水平基准面，将工具电极的水平定位面贴置于主轴头（或平动头）的水平基面，工具电极即实现了自然校正。

3）如果因某种原因，工具电极柄、工具电极的水平面均未与工具电极的成形部位采用同一工艺基准，那么无论采用垂直定位元件还是采用水平基面，都不能获得自然的工艺基准校正。这种情况，必须采取人工校正。

实现上述人工校正必须具备如下条件：要求工具电极的吊装装置上装有具备一定调节量的万向装置，其上有可供方便调节的环节，如图 2.6-10 中的调节螺栓；还要求工具电极上有垂直基准面或水平基准面。校正操作时，将千分表或百分表顶压在工具电极的工艺基准面上，通过移动坐标（垂直基准校正移动 Z 坐标，水平基准校正时移动 X 和 Y 坐标），观察表上读数的变化估测误差值，不断调整万向装置的方向来补偿误差，直到校准为止。

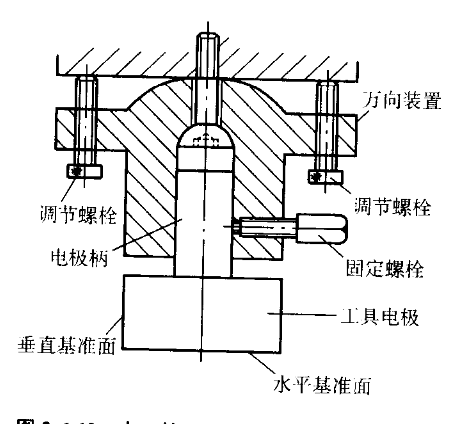


图 2.6-10　人工校正工具电极的电极吊装装置

用上述方法校正垂直基准时，必须在两个彼此平行的垂直基准面上重复上述操作。两个垂直基准面的夹角越接近 90°，越容易实现准确校正。

水平基准校正时，也必须在 X、Y 两个方向重复操作。

2.1.5　工具电极与工件的找正

工具电极和工件的工艺基准校正以后，必须将工具电极和工件的相对位置对正（找正），方能在工件上加工出位置准确的型孔。对正作业是在 X、Y 和 C 坐标三个方向上完成的。C 坐标（即极坐标）的转动是调整工具电极的 X 和 Y 向基准与工件 X 和 Y 基准之间的角度误差。工具电极与工件的对正方法如下。

1）移动坐标法　移动坐标法适用于工件和工具电极都有垂直基准面的加工。如果工具电极是非规则圆形剖面的几何形状，必须在移动 X、Y 坐标之前先转动 C 坐标，令工具电极在水平面内转过某一角度，使工具电极的 X、Y 基准与工件一致。

有些没有 C 轴（转动、分度轴）的电火花加工机床，则应采用有调节水平转角功能的工具电极夹头附件。

在安装工件时应尽量使工件的工艺基准面与工作台平行。图 2.6-11 是不正确的安装方法，它在移动工作台的 Y 坐标时，不仅移动了 X 向基准，而且也相应地移动了 Y 基准，不但使操作麻烦，也增加了出错的机会。

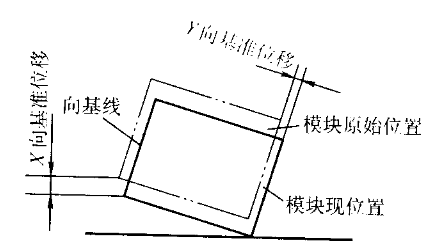


图 2.6-11　X、Y 基准不平行于 X、Y 坐标时，移动 X 基准同时造成了 Y 基准位移

工具电极和工件的工艺基准校正以后，然后采用一个原理简单的接触指示器来使工具电极和工件建立准确的相对位置值，其工作原理如图 2.6-12 所示。先将工具电极移开工作，通过移动 X 坐标使工具电极和工件的垂直基准接近，同时密切监视电压表上的指示，当电压表指标值急剧变化的瞬间，停止移动坐标，此时，工具电极和工件的垂直基准重合。如图 2.6-12，x_0 是工具电极垂直基准与工艺基准的实际值；X_0 是工件垂直基准与工艺基准的实测值。以电极加工件垂直基准的重合点为零，移动 X 坐标（$x_0 + X_0$），则使两



者的工艺基准在 X 方向重合。然后，在 Y 轴重复上述操作，则使两者的工艺基准在 Y 方向重合。这样，工具电极和工件即实现了找正。

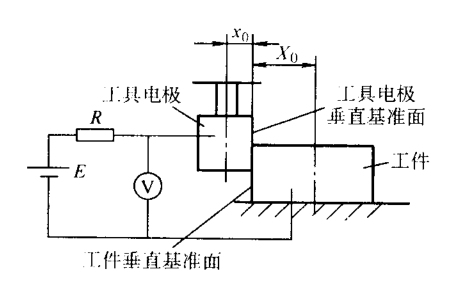


图 2.6-12 工具电极与工件的垂直基准接触定位的示意图

加工多型模或级进模时，可根据下一个型孔与前一个型孔的距离尺寸值继续移动 X、Y 坐标，直至对正下一个型孔为止。

这种方法对正的精度与工具工件接触点的确定精度有密切关系。因此，确定接触点的操作必须十分谨慎。尽管如此，这种方法还存在 10 μm 左右的误差。所以，更高级精度的定位，应采用性能更灵敏的接触点指示器。

20 世纪 80 年代后新型的先进电火花成形机床，可以使上述操作数显示或数控化，从而使操作大大简化，可靠性和精度都有所提高。

2）导向法 导向法多用于电火花成形的冲模凸凹模配合加工。操作方法是：首先，将镶有模具冲头的上模固定在主轴头的基面上，实行水平基准自然校正；然后，用长于凸模的导柱将上模板和下模板穿在一起，用导柱和导柱孔对下模定位，实行固定；固定可靠后，将主轴头升起，拔除导柱，便可开始加工，如图 2.6-13 所示。

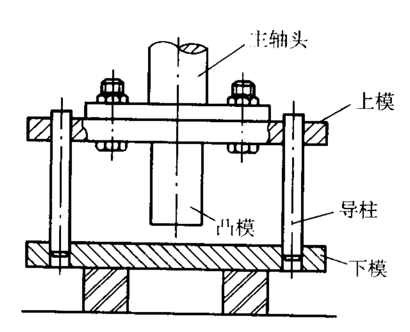


图 2.6-13 用导向法找正冲模凸凹模配合加工

导向法的定位校正精度取决于导柱孔和导柱的加工精度。

3）复位法 在找正操作前，工件上已经有型孔或型腔，且原型孔或型腔具备被承认的工艺基准，则可采用复位法进行工具极和工件的找正。这种情况多为工具电极的重修复位。找正时，工具电极应尽可能与原型孔相符合。校正操作的原理是利用电火花机床所具有的独特的闭环伺服系统或“接触感知”功能（系统具有自动保持工具电极与工件之间“若接若离”的放电间隙功能），通过火花放电时的进给深度来判断工具电极与原型孔的符合程度。也就是说，只要工具电极与原型孔未完成符合，那么，总是可以通过移动某一坐标的某一方向，来继续加大进给深度。如图 2.6-14 所示情况，当工件向右偏离工具电极的工艺基准时，只要向左移动坐标（即工件左移），即会加大加工进给深度，直至两者工艺基准完全对正为止。通过反复调整各坐标准置，使进给深度达到最大值时（即调整任一坐标的任一方向都会减少进给深度时），就认为工具电极与工件的原型孔实现了找正。

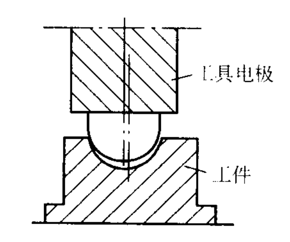


图 2.6-14 用复位法找正工件和工具电极

实施复位法操作时，必须将电规准置于最小值，这样，既可以不致因火花放电破坏原型孔形状尺寸，又可以在小放电间隙的情况下实现复位法找正、有利于校正对正精度。

20 世纪 80 年代以来生产的大多数电火花成形机床，具有“撞刀保护”（接触感知）功能（即工件和工具电极发生接触时自动停止进给）。借助于此类撞刀保护功能完成复位法找正，具有比靠火花放电法更为优越的特性，因为它可以完全避免电火花腐蚀导致的原型孔损伤或变形。

复位法除应用于工具电极重修复位外，还可以用于修复模具型腔、小余量的电火花成形加工等。

2.2 简单方孔冲模的电火花加工

凹模尺寸为 25 mm × 25 mm，深 10 mm，通孔精度为七级，表面粗糙度 R_a 为 0.25 ~ 2.5 μm，模具图如图 2.6-15 所示，工件材料为 40Cr。

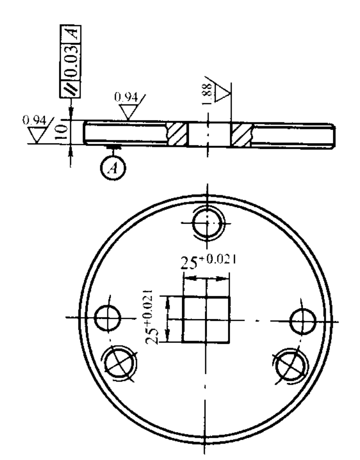


图 2.6-15 模具图

设采用高低压复合型晶体管脉冲电源加工。

电火花加工模具一般都在淬火以后进行，一般应先加工出预孔，如图 2.6-16a 所示，其余与图 2.6-15 相同。

加工冲模的电极材料，一般选用铸铁或钢，这样可以采用成形磨削方法制造电极。为了简化电极的制造过程，也可采用钢电极，材料为 Cr12，电极的精度和表面粗糙度比凹模优一级。为了实现粗、中、精规准转换，电极前端进行腐蚀处理（具体方法见 6.2 节），腐蚀高度为 15 mm，双边腐蚀量为 0.25 mm，如图 2.6-16b 所示。电火花加工前，工件和工具电极都必须经过退磁。

电极装夹在机床主轴头的夹具中进行精确找正，使电极对机床工作台面的垂直度小于 0.01/100。工件安装在油杯上，工件上、下端面保持与工作台面平行。加工时采用下冲油，用粗、精加工两挡规准，并采用高、低压复合脉冲电源，如表 2.6-5 所示。



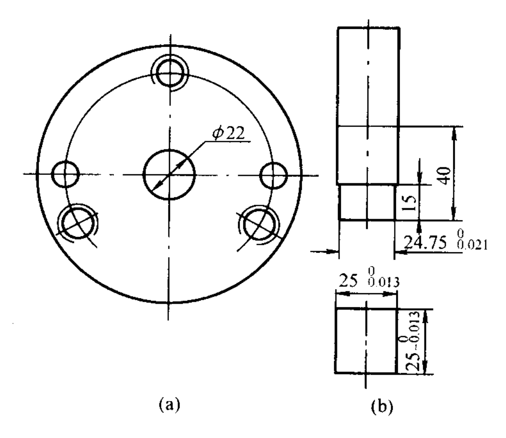


图 2.6-16　电火花加工前的工件工具电极图

表 2.6-5　加工规准

加工规准	脉宽/μs		电压/V		电流/A		脉间/μs	冲油压力/kPa	加工深度/mm
	高压	低压	高压	低压	高压	低压			
粗加工	12	25	250	60	1	9	30	9.8	15
精加工	7	2	200	60	0.8	1.2	25	19.6	20

2.3　电机转子冲孔落料模加工

(1) 工件名称

电机转子冲孔落料模。

(2) 工件技术要求

1) 工件材料　淬火 40Cr。

2) 工件尺寸要求如图 2.6-17 所示。

3) 凸凹模配合间隙　0.04 ~ 0.07 mm。

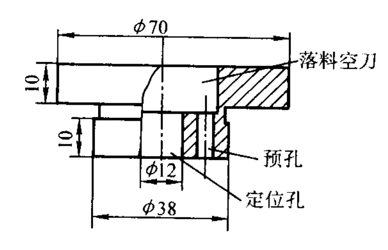


图 2.6-17　工件示意图

(3) 工件在电火花加工前的工艺路线

1) 车　ϕ38 mm 外圆、ϕ12 mm 内孔留 0.3 ~ 0.5 mm 磨量，上下面留 0.4 mm 磨量，其余精车达图样要求。

2) 铣　凹模刃口孔预铣，单面留量 0.3 ~ 0.5 mm，落料空刀铣达图样要求。

3) 热处理　淬火处理。

4) 平磨　磨上下端面达图样要求。

5) 内外圆磨　精磨 ϕ38 mm 外圆和 ϕ12 mm 孔，达图样要求。

(4) 工具电极（即冲头）技术要求

1) 材料　淬火 Cr12。

2) 尺寸要求如图 2.6-18 所示。

(5) 在电火花加工之前的工艺路线

1) 准备定位心轴

① 车　心轴 ϕ6 mm 和 ϕ12 mm 外圆，其外圆直径留 0.2 mm磨量，钻中心孔；

② 磨　精磨 ϕ6 mm、ϕ12 mm 外圆。

2) 车　粗车冲头外形，精车上段吊装内螺纹（参考图 2.6-18），ϕ6 mm 孔留磨量。

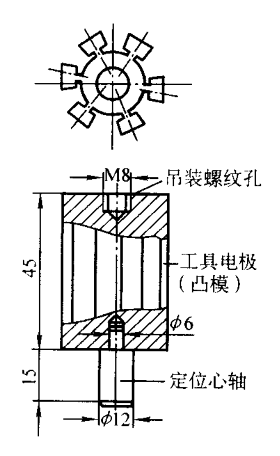


图 2.6-18　工具电极（冲头）和定位心轴示意图

3) 热处理　淬火处理。

4) 磨　精磨 ϕ6 mm 定位心轴孔。

5) 线切割　以定位心轴 ϕ12 mm 外圆面为定位基准，精加工冲头外形，达图样要求。

6) 钳　安装固定连接杆（连接杆用于与机床主轴头连接）。

7) 化学腐蚀（酸洗）　配置腐蚀液，均匀腐蚀，单面腐蚀量 0.14 mm，腐蚀高度 20 mm。

8) 钳　利用凸模上 ϕ6 mm 孔安装固定定位心轴。

(6) 工艺方法

凸模打凹模的阶梯工具电极加工法，反打正用。

(7) 使用设备

北京恒源电火花机床厂制造的 DM7135 电火花成形机床和 JF80B 脉冲电源。

(8) 装夹、校正、固定

1) 工具电极　以定位心轴作为基准，校正后予以固定。

2) 工件　将工件自由放置工作台上，将校正并固定后的电极定位心轴插入对应的 ϕ12 mm 孔（注意不能受力），然后旋转工件，使预加工刃口孔对准冲头（电极），最后予以固定。

(9) 加工规准

1) 粗加工　脉宽：20 μs；间隔：50 μs；放电峰值电流：24 A；脉冲电压：173 V；加工电流：7 ~ 8 A；加工深度：穿透；加工极性：负；下冲油。

2) 精加工　脉宽：2 μs；间隔：20 ~ 50 μs；放电峰值电流：24 A；脉冲电压：80 V；加工电流：3 ~ 4 A；加工深度：穿透；加工极性：负；下冲油。

(10) 加工效果

1) 配合间隙　0.06 mm。

2) 斜度　0.03 mm（单面）。

3) 加工表面粗糙度 R_a　1.0 ~ 1.25 μm。

2.4　钟表齿轮精密冷模加工

(1) 工件名称

钟表齿轮精度冷冲模。

(2) 工件技术要求

1) 工件材料　淬火 Cr12。

2) 工件尺寸要求如图 2.6-19 所示（齿数：45；齿高：1.5 mm）。

3) 凸凹模配合间隙　0.02 mm。

(3) 工件在电火花加工前的工艺路线

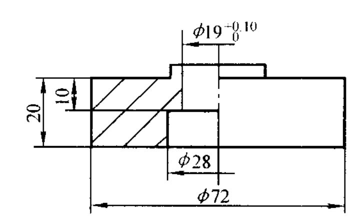


图 2.6-19 工件示意图

1）车 除上下平面留 0.4 mm 磨量、ϕ19 mm 孔留 0.3～0.5 mm磨量外，其余精车达图样要求。

2）热处理 淬火处理。

3）平磨 磨上下面达图样要求。

4）内圆磨 精磨 ϕ19 mm 孔。

（4）工具电极（即冲头）技术要求

1）材料 淬火 CrWMn。

2）尺寸要求如图 2.6-20 所示。

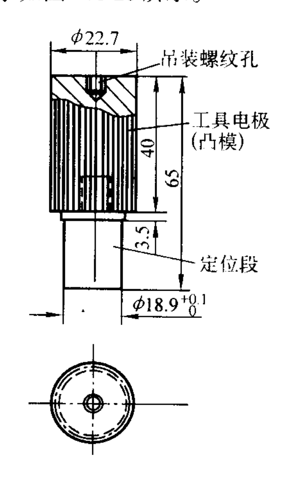


图 2.6-20 工具电极（冲头）示意图

3）电火花加工之前的工艺路线

① 车 各尺寸均留 0.3～0.5 mm 磨量，两端钻工艺中心孔。

② 铣 按图样要求滚齿，留 0.2 mm 磨量。

③ 热处理 淬火处理。

④ 磨齿 精磨齿形，达图样设计要求。

⑤ 外圆磨 ϕ18.9 mm 处精磨。

⑥ 化学腐蚀 首先将 ϕ18.9 mm 处涂层保护，并配置腐蚀液。腐蚀第一阶梯（粗加工段）：腐蚀量单面 0.10 mm；将第一阶梯涂层保护后再腐蚀第二阶梯（精加工段）；腐蚀量单面 0.02 mm。粗加工段高度 16 mm；精加工段高度 22 mm。

（5）工艺方法

此法凸模打凹模的多阶梯工具电极加工法，具体是“钢打钢”、反打正用。

（6）使用设备

北京恒源电火花机床厂制造的 D7135 电火花成形机床和 JF80B 脉冲电源。

（7）装夹、校正、固定

1）工具电极 以 ϕ18.9 mm 处作为基准校正后予以固定。

2）工件 采用放电定位法校正工作。用小能量火花放电的方法作业（使用规准：$t_i = 2\ \mu s$；$t_0 = 20\ \mu s$；$i_e = 2$ A）。

（8）加工规准

1）粗加工（使用第一阶梯） 脉宽：16 μs；间隔：50 μs；放电峰值电流：12 A；脉冲电压：173 V；加工电流：4 A；加工极性：负；下冲油；加工深度：＜15 mm 穿透。

2）精加工 脉宽：2 μs；间隔：20 μs；放电峰值电流：12 A；脉冲电压：80 V；加工电流：2～3 A；加工极性：负；下冲油；加工深度：＜25 mm 穿透。

（9）加工效果

1）配合间隙 0.02 mm。

2）斜度 0.007 mm（单面）。

3）加工表面粗糙度 R_a 0.7～0.8 μm。

3 小孔、小深孔、异形小孔、多孔、微孔等电火花加工

非冲模类的小孔、深孔、多孔、异形小孔和微孔等，很难甚至无法采用常规切削加工，这时采用电火花加工就可做到经济、合理、可行。

对小孔、微孔、深孔，目前尚难作出确切的定义，在不同场合下有不同的理解。一般认为，小孔的直径范围为 2～0.1 mm，微孔为直径小于 0.1 mm 的孔，深孔为孔的深度与直径之比（深径比）大于 10 的孔。

3.1 小孔电火花加工

小孔加工也是电火花穿孔成形加工的一种应用。小孔加工的特点是：①加工面积小，深度大，直径一般为 ϕ0.1～ϕ2 mm，深径比达 20 以上；②小孔加工均为盲孔加工，排屑困难。

小孔加工由于工具电极截面积小，容易变形，不易散热，排屑又困难，因此电极损耗大。工具电极应选择刚性好、容易矫直、加工稳定性好和损耗小的材料，如铜钨合金丝、钨丝、钼丝、铜丝等。加工时为了避免电极弯曲弯形，还需设置工具电极的导向装置。

为了改善小孔加工时的排屑条件，使加工过程稳定，常采用电磁振动头，使工具电极丝沿轴向振动，或采用超声波振动头，使工具电极端面作轴向高频振动，进行电火花超声波复合加工，可以大大提高生产率。如果所加工的小孔直径较大，允许采用空心电极（如空心纯铜管或黄铜管），则可以用较高的压力强迫冲油，加工速度将显著提高。如果机床主轴有旋转功能，或采用旋转头附件使工具电极转动，或使工件转动，则除可提高加工速度外，还可提高加工小孔的圆度和尺寸精度。此时可采用反拷加工制造电极，要点如下。

1）电极材料 常用的材料有纯铜、黄铜、铜钨合金细杆和较粗的钨丝和钼丝等。

2）电极的反拷加工 用机加工制造直径很小的细长电极很困难，电火花反拷加工是一种行之有效的工艺。如图 2.6-21 在机床工作台上用一块长约 50 mm、厚 5 mm 耐电火花腐蚀的铜钨合金或硬质合金块作为反拷电极，其工作面必须磨过，并校正到与坐标方向平行。要修拷的电极夹在主轴夹头内，可随主轴旋转和上下运动。然后用图中方法进行粗烤、开空刀槽和精拷加工。粗加工余量以 0.2～0.3 mm 为宜；精加工余量以 0.02～0.05 mm 为宜，在要求高一些的场合，还应进行超精反拷加工，加工余量为 5～10 μm，使 R_a ＜0.32 μm。

3）加工方法 小孔电火花加工规准的选择，主要根据孔径、精度、深度、机床条件等因素综合考虑。一般采用一挡规准加工到底，只是在孔径发生变化时才转换规律。

对于孔径大于 1 mm 的孔，如果加工之前没有预孔，可用铜管作电极打出预孔，对于孔径小于 1 mm 的小孔，用实心电极加工时，可以把电极拷扁，以利排屑。所谓拷扁，就是将电极圆周沿轴向拷掉一部分，这样，在加工时主轴回转，由于保持了一个直通外界的扁口通道，可以使排屑通



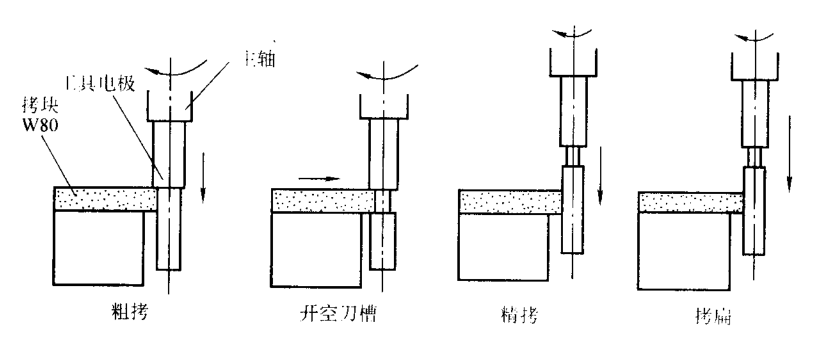


图 2.6-21　反挎加工法

畅，加工稳定。挎扁部分一般为直径的 1/6～1/8，太小效果不明显，太大则电极刚性不好，损耗增大（参见图 2.6-34）。

为了减小孔的锥度，在加工孔通后，可继续上下"珩磨"几次，直到不放电火花为止。

小孔电火花加工用的脉冲电源，采用 RC 线路脉冲电源有很大的优越性。线路简单、成本低、单个脉冲能量可以做得很小，且瞬时放电的峰值电流较大，抛出材料汽化百分比和抛出力较大，可以得到较好的表面粗糙度和加工稳定性。用晶体管脉冲电源时，脉宽应小于 10～5 μs，峰值电流在 5～1 A之间，正极性加工。虽然电极损耗比较大，但对通孔而言，可以多进给一段距离进行修光。

3.2　小深孔的电火花加工

电火花高速小孔加工工艺是近年来新发展起来的。其工作原理的要点有三：一是采用中空的管状电极；二是管中通高压工作液冲走加工屑；三是加工时电极作回转运动，可使端面损耗均匀，不致受高压、高速工作液的反作用力而偏斜，相反，高压流动的工作液在小孔孔壁按螺旋线轨迹流出孔外，像静压轴承那样，使工具电极管"悬浮"在孔心，不易产生短路，可加工出直线度和圆柱度很好的小深孔。加工时工具电极作轴向进给运动，管电极中通入 1～5 MPa 的高压工作液（自来水、去离子水、蒸馏水、乳化液或煤油），见图 2.6-22。由于高压工作液能迅速将电极产物排除，且能强化火花放电的蚀除作用，因此这一加工方法的最大特点是加工速度高，一般小孔加工速度可达 20～60 mm/min 左右，比普通钻削小孔的速度还要快。这种加工方法最适合加工 0.3～3 mm 左右的小孔，且深径比可超过 100。

用一般空心管状电极加工小孔，容易在工件上留下毛刺料心，阻碍工作液的高速流通，且过长过细时会歪斜，以致引起短路。为此高速加工小深孔电火花加工时采用专业厂特殊冷拔的双孔管状电极，其截面上有两上半月形的孔，如图 2.6-22 中放大截面图形所示，这样加工中电极转动时，在工件上不会留下毛刺料心。

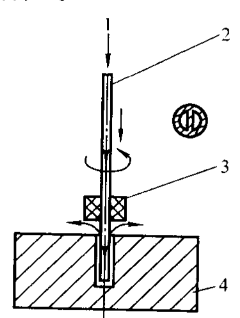


图 2.6-22　电火花高速小孔加工原理示意图

1—高压工作液；2—管电极；
3—导向器；4—工件

我国加工出的样品中有一例是加工直径为 1 mm、深 1 000 mm的小深孔，且孔的尺寸精度和圆柱度均很好。这种方法还可以在斜面和曲面上打孔，已被用于线切割零件的预穿丝孔、喷嘴以及耐热合金等难加工材料的小孔加工中，并且会日益扩大其应用领域。我国最早生产这类小深孔高速电火花加工机床的单位和产品有苏州电加工机床研究所 D703E 型、苏州三光电加工公司 DS703 型、汉川机床厂 D703A 型等，现在已有多种数显或数控化的电火花高速加工小深孔的商品化机床。

值得一得的是苏州电加工机床研究为适应航空、航天工业产品中小孔、深孔、斜孔等的需要，在上述电火花高速小孔加工机床的基础上，研制生产了三轴、四轴、五轴、六轴、八轴的数控高速电火花小孔专用商品化机床。今对此类机床分别介绍其性能、适用范围和加工实例。

3.2.1　D703 型高速电火花小孔加工机床及加工实例

图 2.6-23 为苏州电加工机床研究所生产此类机床的照片外形。

1）机床的主要性能　能加工 ϕ0.3～3 mm 的小孔、深小孔、斜孔，最大深度与孔径之比可达 100:1 甚至 300:1，可加工淬火钢、不锈钢、硬质合金等任何导电材料；根据工件材料和孔径、孔深的不同，加工速度可为 10～60 mm/min；可使用自来水作工作液；根据用户要求，在点位制三轴数显和数控系统的基础上，增加用简单圆管电极进行数控电火花铣槽的加工功能，成为具有一定的通用性和柔性的机床。

2）机床的主要技术规格　工作台尺寸：350 mm × 500 mm，进给伺服行程：400 mm，主轴头行程：250 mm，工作台 $X—Y$ 行程：250 mm × 350 mm，输入功率 3.5 kW。

此类机床能用于加工线切割的穿丝孔，喷油泵上的小油孔，化纤喷丝板的喷丝孔，液压、气动元件的小孔，滤板、筛网上的群孔，喷气发动机零件上的冷却散热孔，以及各种传统方法难以加工的小深孔。

3）深小孔加工实例　见表 2.6-6。

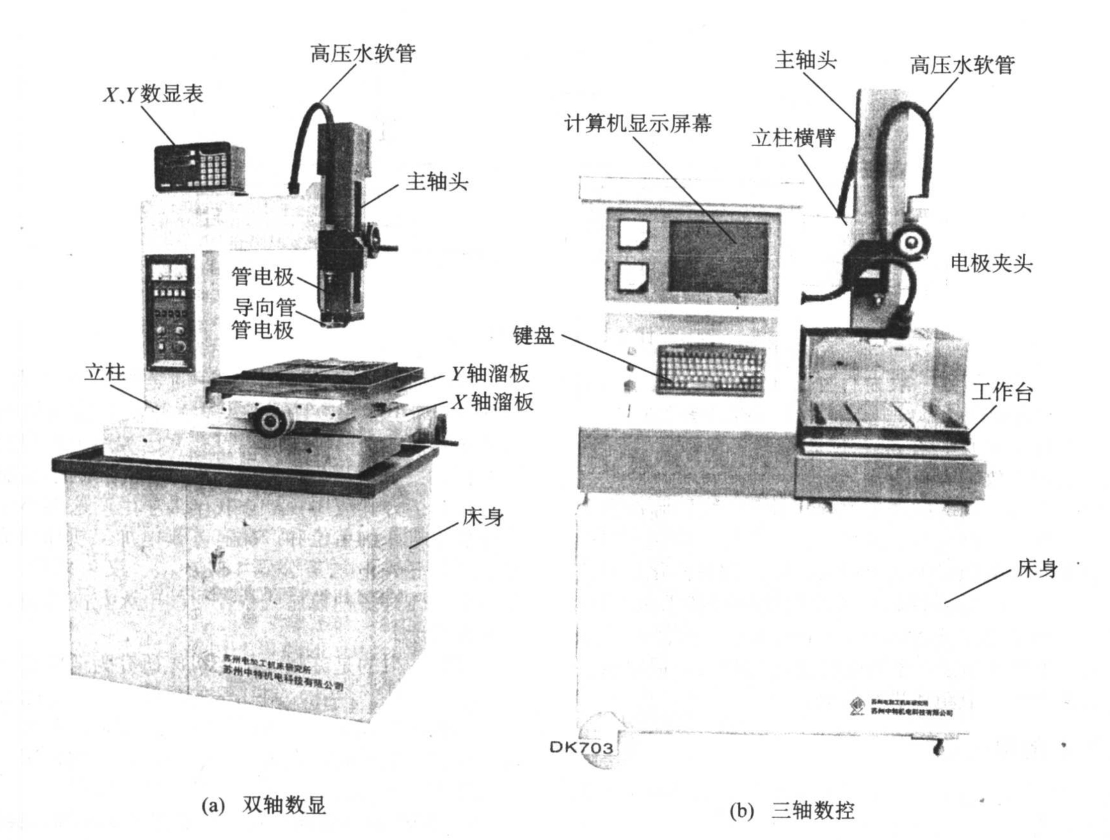
3.2.2　8 轴数控电火花高速小孔加工专用机床及加工实例

图 2.6-24 为苏州电加工机床研究所为航空、航天工业研制生产的 8 轴数控电火花高速小孔加工专用机床的外形图，图 2.6-25 为其照片外形。

（1）机床的主要性能、用途

此类机床是为航空发动机制造业研制的专用设备，主要用于发动机中特殊材料工件空间位置复杂的深小孔加工，如火焰筒安装边、环件等零件，除加工圆孔外，还可加工腰形孔，有一定的通用性和柔性，加工效率高，费用低。

1）加工孔径范围一般在 ϕ0.3～3 mm。
2）深径比可达 300:1 以上。
3）加工速度一般可达 5～60 mm/min。
4）不受材料硬度和韧性限制。
5）该机可有 6～8 个坐标轴。



(a) 双轴数显　　　(b) 三轴数控

图 2.6-23　D703 型高速电火花小孔加工机床

表 2.6-6　深小孔加工实例

工件材料	YG8（硬质合金）	1Cr18Ni9Ti	钢 45	Cr12	导电陶瓷
电极直径/mm	1	1	0.5	0.5	1
加工深度/mm	80	36	30	50	52
加工时间	12 min	38 s	32 s	1 min 50 s	28 min
加工速度 $v/\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$	67	56	58.1	27.3	1.86

6）控制系统采用 586 工控机。

7）交流伺服驱动。

8）加工中可自动修整电极，自动找加工零位，自动换规律，加工到位自动回退。

9）带 14 in 彩显，可显示坐标位置，加工状态，加工点位等信息。

（2）机床的主要技术规格

1）工作台尺寸：850 mm × 850 mm。

2）工作台 *X*、*Y* 轴向行程：630 mm × 800 mm。

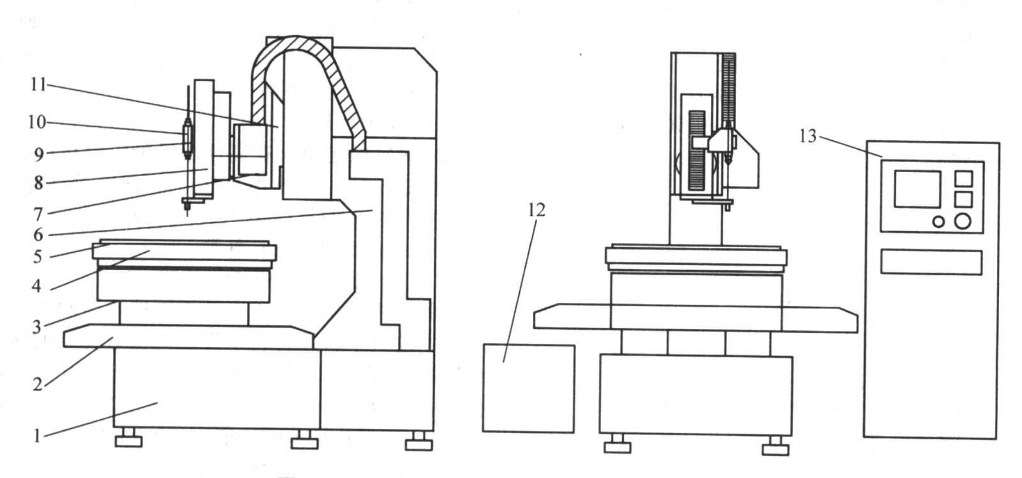


图 2.6-24　8 轴数控电火花高速小孔加工机床外形图

1—床身；2—*XY* 轴拖板；3—*C* 轴回转盘；4—工作液盘；5—工作台；6—立柱；7—*B* 轴回转盘；8—*W* 轴拖板；9—*S* 轴滑块；10—旋转头；11—*Z* 轴拖板；12—高低压工作液系统；13—数控电源箱



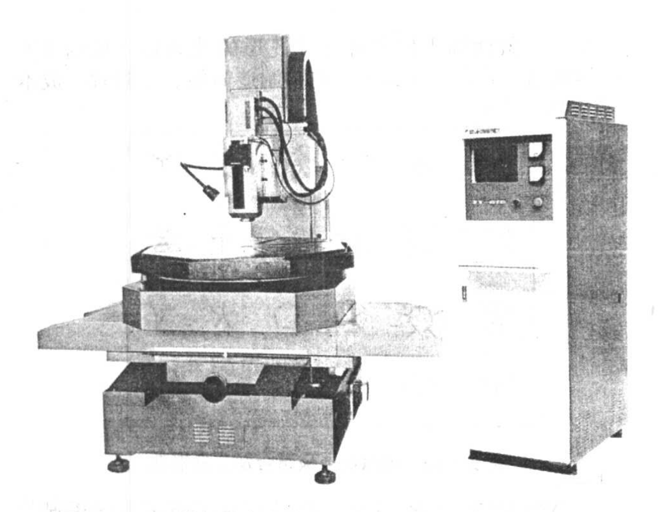


图 2.6-25 8 轴数控电火花高速小孔加工专用机床照片外形

3）主轴头拖板 Z 轴行程：300 mm。
4）工作台 C 轴回转角度：0°～360°。
5）主轴头 W 轴行程：200 mm。
6）旋转头轴、管电极伺服进给 S 轴行程：300 mm。
7）主轴头回转盘 B 轴回转角度：±90°。
8）电极旋转头 R 轴转速：100～150 r/min。
9）可装夹电极管的直径：ϕ0.3～3 mm。
10）电极管导向器与工作台面最大距离：350 mm。
11）工作台面高度：1 150 mm。
12）最大输入功率（380 V，50 Hz）：5 kW。
13）工作液箱容量：200 L。
14）工作液过滤方式：渗透。
15）工作液最大压力：8 MPa。
16）工作台最大承重：5 000 N。
17）机床外形尺寸：1 200 mm×2 500 mm×2 200 mm。

机床共有 8 个运动轴：X、Y、C、Z、W、B、S、R。其中：X、Y 轴为工作台水平向直线运动；C 轴为工作台在水平面向分度、回转运动；Z 轴为主轴头拖板上下运动轴，可根据工件的不同高度，调整主轴头与工件之间的距离；W 轴为上下直线运动轴，实现导向器与工件之间的高度位置的调整，为手动调整轴；B 轴为回转头摆动轴，实现主轴头、管电极加工不同角度的斜孔；S 轴为管电极的直线伺服进给运动轴；R 轴为管电极旋转轴，实现既要夹持管电极在旋转状态下伺服进给，又要向电极管中通入高压工作液及导入脉冲电源的电压和电流。

此类机床已在我国的一些骨干航空发动机制造企业成功应用，如沈阳黎明航空发动机公司、西安航空发动机公司、成都航空发动机公司、贵阳新艺叶片制造厂、西罗叶片制造公司等。加工对象有火焰筒、火焰筒安装边、火焰筒环件、各种单联和多联叶片等。其中有些承接加工美国 GE 公司、英国罗罗公司等世界一流知名企业的航空发动机零件，获得了显著的经济和社会效益。

（3）航空发动机零件加工实例

航空发动机零件材料特殊，大部为高温耐热合金、钛合金；空间位置复杂，大部分为小、深、斜孔，常需 6 坐标机床才能加工；孔的加工精度、表面质量要求较高；孔的数量多，要求加工效率高。通常需用多轴数控电火花高速加工小孔的典型零件有如下多种。

1）喷气发动机叶片　有单联、双联和三联叶片，上有多个冷却小深孔、斜孔，直径为 ϕ0.5～1.5 mm。

2）火焰筒安装边（图 2.6-26）　火焰筒安装边是口字形扇形的边框，边框的截面为卜字形，沿整个扇形边框（二条直线、二条圆弧）上有整排的小斜孔，深径比达 30∶1 以上。斜孔出口打穿时电极管内的高压工作液产生泄漏缺水，有一定的加工难度。

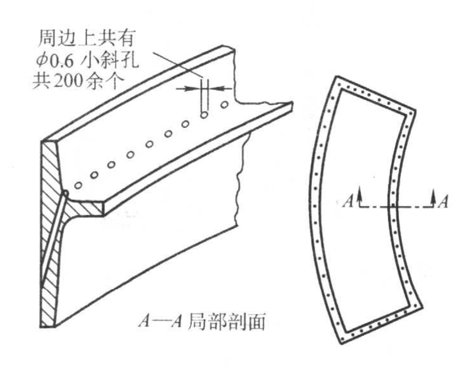


图 2.6-26 火焰筒安装边示意图

3）火焰筒　这类零件上孔的数量很多，孔径大小不一，空间位置分布也较复杂，但孔的加工深度较浅（薄壁）。

4）航空发动机环形件　这类环形件上的孔一般按圆周均匀分布，但这些环形件大多是多层的，所需加工的孔分布在窄槽的底部，并带一定斜角，因此必须设计专用的导向器。此外，有的环形件上要求加工出腰形孔。

3.3 异形小孔的电火花加工

电火花加工不但能加工圆形小孔，而且能加工多种异形小孔，图 2.6-27 为喷丝板异形孔的几种孔形。孔槽宽为 0.05～0.12 mm，公差为 ±5 μm，槽长公差为 ±0.02 mm，孔壁表面粗糙度 R_a 应小于 0.32 μm。

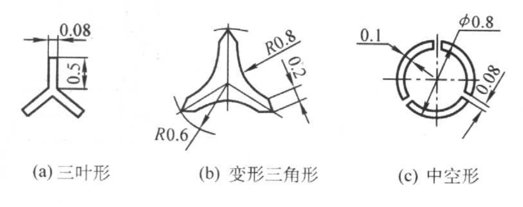


图 2.6-27 喷丝板异形孔的几种孔形

加工微细而又复杂的异形小孔，与圆形小孔加工基本一样，关键是异形电极的制造，其次是异形电极的装夹和找正。

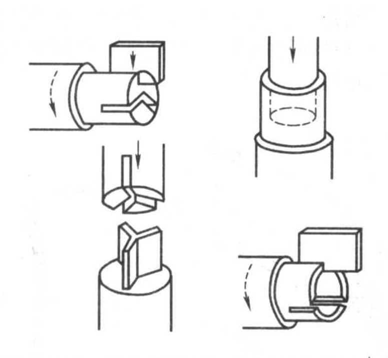
制造异形小孔电极，主要有下面几种方法。

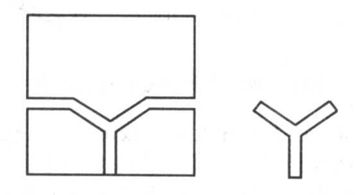
1）冷拔整体电极法　采用电火花线切割加工工艺并配合钳工修磨制成异形电极的硬质合金拉丝模，然后用该模具拉制成异形截面的电极。这种方法效率高，一致性和质量好，用于较大批量生产。冷拔、冷挤压的 Y 形和十字形整体电极已在加工化纤纤维喷丝板的专业工厂中广泛使用。

2）电火花线切割加工整体电极法　利用精密电火花切割加工制成复杂成形截面的整体异形电极。这种方法的制造周期短、精度和刚度较好，易保证型孔加工质量，用于试制和小批生产。

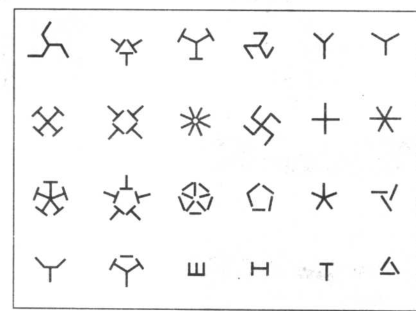
3）电火花反拷加工整体电极法　如图 2.6-28 即为电火花反拷加工制造异形电极的示意图。用这种方法制造的电极定位装夹方便而误差小。

由于加工异形小孔的工具电极结构复杂，装夹、定位比较困难，需采用专用夹具。图 2.6-29 为三叶形异形孔电极的专用夹具示意图，电极在装夹前需要注意修光、细研磨后装入夹具内紧牢。夹具装在机床主轴上，应调好电极与工件的垂直度及对中性。异形小孔加工时的规准选择基本与圆形小孔加工相似。


图 2.6-28 电火花反拷加工异形电极示意图

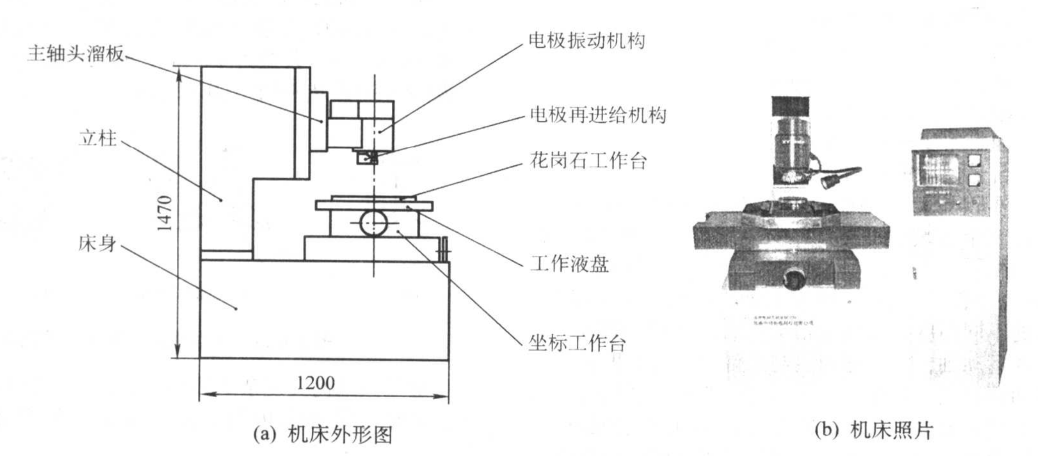

图 2.6-29 异形孔电极三角形夹具示意图

化学纤维喷丝板异形孔的电火花穿孔加工，又可分为整体电极加工或扁丝电极组合加工法两种。后者的特点是在一台机床上用同一规格的单片扁电极（如钟表游丝），经分段组合加工，就能加工出多种多样孔形的喷丝板（见图 2.6-30，因此具有孔形变换方便、电板制造简便、工时省、成本低等优点。


图 2.6-30 用扁丝电极组合加工异形孔

我国针对图 2.6-30 的异形孔已研制了数字程序控制异形孔喷丝板专用电火花加工机床。电极丝进给由步进电动机伺服控制，送进速度能数显，并能自动进行组合加工、极性转换、电规准转换、工作台回转和自动分度、电极自动回升，可实现单孔全自动加工。

图 2.6-31 为苏州电加工机床研究所研制生产的 ZT007 型整孔喷丝孔加工机床的外形。此机床能用简单形状的扁电级（如 ϕ0.1 mm × 0.5 mm 的手表游丝），通过数控组合，可加工出如 Y、十、米、△ 形等（参见图 2.6-30）。也可采用 ϕ0.1 ~ 0.3 mm的细丝电极数控加工小圆孔。



(a) 机床外形图　　(b) 机床照片

图 2.6-31 ZT007 型数控喷丝孔加工机床

机床提供开放式孔形编辑功能，用户可自主编辑各种由单槽或单孔组成的异形孔。机床采用细长条电极加工，由滚轮夹紧伺服进给，加工到设定深度后可自动回退。电极损耗后通过再进给机构可以自动补偿和自动修整电极丝，有很大的工艺适应能力和加工柔性，对异形小孔、成批生产有很好的经济效益和社会效益。

机床的主要技术参数：

工作台面尺寸：320 mm × 320 mm；

工作台 $X \times Y$ 行程：250 mm × 320 mm；

主轴头升降行程（W 轴）：150 mm；

主轴电极丝伺服进给量（Z 轴）：1 μm/步；

C 轴分度范围：0° ~ 360°；

最大加工电流：0.4 A；

输入功率：1 kW。

3.4 多孔的电火花加工

一般的多孔电火花加工，只要增加相应的工具电极数量，安装在同一个主轴上，就可以进行加工，实际上相当于改变了加工面积。与单孔相比，要获得同样的进给速度和较大的蚀除量，就得增加峰值电流，这样，孔壁的表面粗糙度就会下降。条件许可时，最好采用多回路脉冲电源，每一独立回路供给 1 ~ 2 个工具电极，总共有 3 ~ 4 个回路。

有时需用电火花加工有成千上万个小网孔的不锈钢板筛网，这时可分排加工，每排 100 ~ 1 000 个工具电极（一般用黄铜丝作电极，虽然损耗大，但刚度和加工稳定性好），再进行分组、分割供电。加工完一排孔后，移动工作台进行第二排孔的加工。由于工具电极丝较长，加工时离工件上表面 5 ~ 10 mm 处应有一多孔的导向板（导向板不宜过薄或过厚，以 5 mm 左右为宜）。有时需加工方形小孔的筛网或过滤网，此时工具电极可选用方形截面的纯铜或黄铜杆，其端部用线切割成许多小深槽，再转过 90°重复切割一遍，就成为许多小的方电极，如图 2.6-32 所示。加工出一小块方孔滤网后，再移动工作台，继续加工其余网孔。要保证移动距离精确，并消除丝杠螺母间隙的影响，最好在数显或数控工作台上加工。

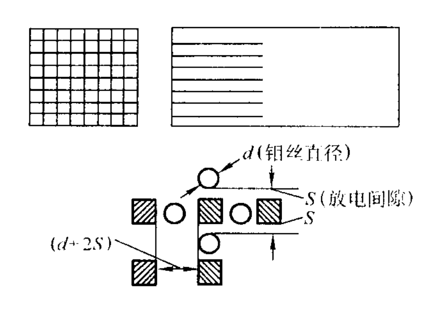


图 2.6-32　加工小方孔滤网用的工具电极

工具电极用钼丝线切割加工时，切出的缝宽比钼丝直径增大了 2 倍的单边放电间隙 S，在用小方形工具电极加工过滤网孔时，四边也各有一个放电间隙 S，留下的滤网筋条的宽度约等于钼丝的直径 d，见图 2.6-32 中的放大图形。

3.5　微孔电火花加工

在光学系统中的光栅、喷墨打印机喷孔都需 10 ~ 50 μm 的小孔。加工小孔的关键是要有直径小的工具电极，而且要安装得与待加工孔的工件表面非常垂直。

1）微小轴（工具电极）的制作　实现微细孔电火花放电加工的首要条件之一是微小工具电极的在线制作和安装。与丝矫直、细丝拉拔或金属块反拷等方法相比，采用精密旋转主轴头与线电极放电磨削相结合制作微小轴（工具电极）的方法，更容易得到更小尺寸的电极轴，且易保证较高的尺寸和形状精度。

上述微小轴（工具电极）的加工原理如图 2.6-33 所示。轴的成形是通过线电极丝和被加工轴间的放电加工来实现的。线电极磨削丝缓慢沿走丝导块上导槽面滑移，被加工轴随主轴头旋转及轴向进给。

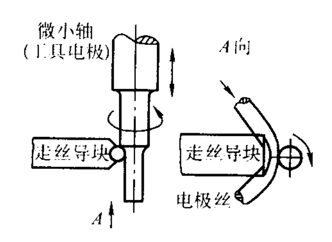


图 2.6-33　微小轴（工具电极）的加工原理

工具电极轴的材料为纯铜，加工电压为 100 V，放电电容为 1 000 pF，正极性加工，浇注的工作液为煤油。

在加工过程中，被加工轴随主轴的旋转运动在保证轴的加工圆度的同时，避免了集中放电或短路，使放电加工连续正常进行。线电极磨削丝沿导槽面的移动，补偿了自身的放电损耗。确保被加工轴的尺寸精度。而若使主轴不旋转，仅利用线磨削丝沿导槽面相对被加工轴的移动，亦可实现非圆截面的加工。

值得注意的是，采用旋转主轴头与线电极放电磨削走丝机构相结合制作微小轴（工具电极）的方法时，旋转主轴的径向跳动，线电极磨削丝的直径均匀度以及走丝平稳性都直接影响轴的加工精度和可能达到的极限尺寸。

2）高深宽比微小孔的加工　利用微小轴作为工具电极，轴向进给直接加工微小孔时，很难达到稳定的加工状态，因此加工效率极低，在非圆截面孔的加工中更成问题。使工具电极随主轴旋转，利用微小圆轴（$\phi \leqslant 0.1$ mm）进行微小圆孔的加工一般可顺利达到 0.4 mm 左右的深度。但当孔深达到约 0.5 mm 以上时，由于排屑不畅，加工状态趋于不稳定，加工效率急剧下降，甚至加工无法继续进行。加工微小孔时利用工作液循环强制排屑很难奏效，排屑需依靠放电时产生的压力和小气泡自动带出。工具电极的旋转虽然有助于排屑和提高加工稳定性，但由于侧向放电间隙较小，使得能够加工的孔深毕竟有限。

为实现高深径比微小孔的高效率加工，可采取修扁工具电极的方法。如图 2.6-34 所示，利用线电极放电磨削机构将电极轴二边对等削去一部分。实际单侧削去部分约为轴径的 1/5 ~ 1/4，既不过分削弱轴的刚度和端面放电面积，又造成足够的排屑空间。用这种削边电极加工微小孔时，电极随主轴旋转，排屑效果显著改善，在加工深径比达 10 以上的微小孔时，能够保持稳定的加工状态和较高的进给速度，用煤油作为工作液在不锈钢材料上贯穿 1 mm 的微小孔所用加工时间为 3 ~ 4 min。

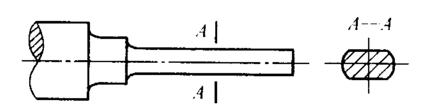


图 2.6-34　削边电极示意图

南京航空航天大学、哈尔滨工业大学、清华大学等对电火花微细精密加工都进行了和正在进行着研究。

4　超声波电火花复合加工小孔

在普通的电火花加工中，引入工具电极的超声振动，可以改善放电间隙状况，强化电火花加工过程，提高生产率。它是电火花和超声波复合加工工艺，一般称为超声电火花复合加工或超声放电复合加工。在异形喷丝孔的加工实践中，取得了利用超声电火花复合加工提高生产率 3 ~ 20 倍的工艺效果。具体方法是：在普通电火花机床上附加超声振动器，利用现有的晶体管矩形波脉冲电源，就能提高原有机床的精微加工能力，进行高生产率的精微加工。

4.1　复合加工装置组成及原理

如图 2.6-35 所示，超声波电火花复合加工小孔的装置是在原电火花加工机床的主轴下面附加一个超声振动头附件，超声振动头由两片压电陶瓷 1（又称超声换能器）和变幅杆 2 组成。超声波发生器把超声频的脉冲电波输给压电陶瓷，压电陶瓷把电能转换为超声频的机械伸缩振动能传给变幅杆，变幅杆把超声频的机械振动波传给电极工具（可为圆形或 Y 形、或（　）形截面的短杆），使工具电极的下端面作每秒 4 万 ~ 5 万次的超声频振动，振幅约为 1 ~ 2 μm。此时晶体管矩形波脉冲电源向工具电极和工件间输出脉冲电压，如果间隙合适，就会在煤油工作液中火花放电。

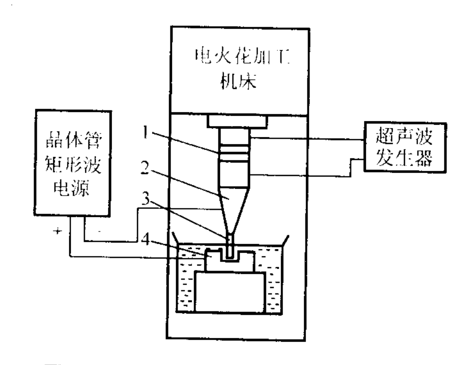


图 2.6-35　超声波电火花复合加工小孔装置

1—压电陶瓷；2—变幅杆；3—工具电极；4—工件

4.2 超声电火花复合加工的主要规律

中国纺织大学和哈尔滨工业大学及山东大学等对超声波电火花复合加工进行了系统深入的试验研究，得出了电极直径（加工面积）和脉冲宽度对复合加工效果的影响，如图2.6-36和图2.6-37所示。

1）试验表明，加工面积较小时，采用超声电火花加工要比普通电火花加工生产率高，有很大的实用价值，但加工面积增大，生产率反倒不如普通电火花加工。在某一加工面积下，两种加工方法生产率基本相同。这一加工面积就是两曲线的交点横坐标。通过试验找到这个分界点是有实际意义的，它可以供人们在是否选择超声电火花复合加工时作参考（见图2.6-36）。当然，在不同的机床、不同的加工参数下，加工面积的分界点是不同的。本试验在日本DP30机床和国产D6135A机床上作了加工面积影响试验，发现当电极直径在ϕ1.5 mm以上时，复合加工的效果是不好的。

2）试验中还发现，即使用很窄的脉冲宽度进行大面积的加工，超声电火花复合加工的生产率也很难比普通电火花加工有所提高。例如在DP30机床上，脉冲宽度4 μs，脉冲间隙6 μs，峰值电流4～5.4 A，用ϕ5的纯铜电极加工高碳钢，在同样的15 min加工时间里，普通电火花加工比超声电火花加工的加工深度还要大一些。

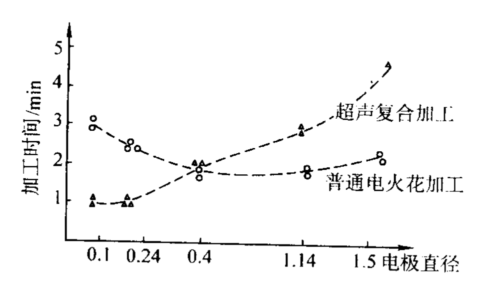


图2.6-36 超声电火花复合加工时电极直径与加工时间的关系
机床：DP30 工件：GCr15 电极：纯铜 t_i = 30 μs；t_0 = 30 μs i_e = 4.3 A 加工深度：1.07 mm 超声振幅约1 μm 超声频率43 kHz

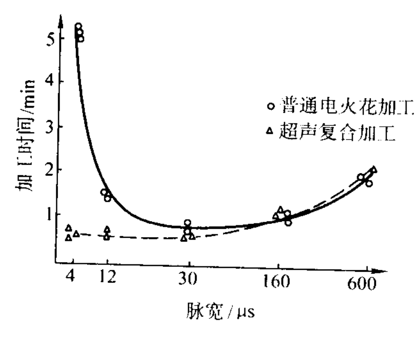


图2.6-37 超声电火花复合加工时脉冲宽度与加工时间的关系
机床：DP30 工作液：煤油 峰值电流：i_e = 4.3 A 工具：Y形喷丝孔紫铜电极 工件：厚0.5 mmGCr15块规 超声频率：f = 43 kHz 超声振幅：A = 1～2 μm

对加工面积的影响，初步认为：首先由于液体具有惯性，所以高频的超声振动不可能像低频抬刀那样，在一次振动周期中，能抽吸、排挤、更新间隙中的工作液，排出加工屑。而间隙中超声强烈的机械效应，将使电蚀产物上下剧烈振动，在工具边缘处，将导致电蚀产物向浓度较低的四周扩散游离，有排出放电区的运动趋势。但当加工面积稍大时，处于加工区中部的加工屑需通过迂回曲折较长的排屑路径，才能排出放电区。这样就可能由于电蚀产物的剧烈上下运动而造成频繁的过渡电弧、短路、稳定电弧等非正常放电（示波器波形照片证实，大面积复合加工时有大量非正常放电波形）。放电面积的变大，使蚀除能力下降，加工速度随之降低。其次，超声空化效应虽然对排屑有好处，但在大面积超声加工时，空化产生的气泡增多，积聚在电极间隙中，容易形成在气体中击穿放电，也是造成大面积加工时超声电火花加工效果变坏的原因。

超声振动对电火花击穿放电、金属蚀除、电蚀产物排出、间隙消电离等一系列过程的影响较为复杂。它有利于电离击穿，使脉冲利用率提高；它使排屑条件得到一些改善；它也能使过渡电弧放电增多，间隙消电离变差。

认为电火花加工中加入超声振动可以改善排屑条件来提高生产率的看法是不够全面的，实际上只有在小面积、小振幅、窄脉宽等精微加工条件下，上述看法才是正确的。在加工面积较大、粗中加工时，不宜选用超声电火花加工。不合适的加工条件将使超声电火花加工火花放电减少，非正常放电增多。

用煤油工作液加工时，超声强度可取得小些（此时可不产生超声空化），以避免形成电弧。水作工作液时，超声强度可稍大些。

3）超声波电火花复合加工之所以能提高加工效率，其原因如下。

① 当普通电火花窄脉宽小能量加工时，脉冲利用率很低，一般不超过10%，往往大部分为空载脉冲。约为5 μm微小的放电间隙对机床的进给系统要求很高，机床主轴就容易在短路和开路两种状态下交替振动进给，火花放电率很低。加入电极的超声振动后，使放电间隙在1～2 μm的区间高速变化，容易捕捉到合适的火花击穿间隙，在一短时间内，不用主轴进给，就能增加火花放电概率，而且机床的进给灵敏度愈差，其相对效果就愈好。

② 由于超声波的传播，超声效应使电蚀微粒及两极分子运动加剧，导致电离击穿概率增大，使窄脉宽条件下脉冲利用率增加。

由试验可知，超声电火花复合加工有一定的适用范围，在小面积加工领域，它可以发挥优势，而在面积较大的型腔加工中，这种加工方法是不宜采用的。另外，使较重的型腔加工电极作超声振动，实现起来也是相当困难的。

试验研究和理论分析可以证明，超声电火花加工对小面积精微加工是一项有一定实用价值的复合工艺。采用方波脉冲电源进行复合加工时，关键的问题是合理选择加工参数，尤其是脉冲宽度和超声强度。精微加工时，脉冲宽度小于10 μs，超声振幅不大于1 μm，可获得较好的工艺效果。

方波脉冲电源的超声电火花复合加工适用于微细孔、窄缝等精微加工，是提高精加工生产率的一个有效的工艺方法，可以在不降低表面粗糙度和精度前提下，提高生产率3～20倍。

近年来，哈尔滨工业大学等单位还研究开发了超声波电火花同步复合加工技术，使提供火花放电能量的脉冲电源输出的脉冲频率和超声振动的频率同步（相等），即工具电极的下端面向下超声振动时，脉冲电源开始给工具电极和工件加上100 V左右的电压，工具端面向下到一定小的间隙时，即开始火花放电。当工具电极端面向上时，处于脉冲间歇状态，实现“弹无虚无”、“百发百中”的同步放电，克服了原超声电火花复合加工时超声振动频率和脉冲电源频率“各自为政”、相互脱节的缺点。

实现超声电火花同步复合加工最简单的方法是采用RC线路脉冲电源，如图2.6-38所示。当工具电极下端面向上振动处于接近最高点时，*RC*线路脉冲电源即向电容、工具



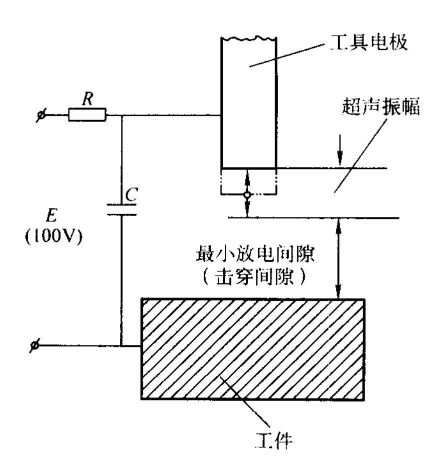


图 2.6-38 超声电火花同步复合加工

电极和工件充电；当工具电极端面自最高点向下振动时，电容上已基本充电完毕，一旦电极端面向下至合适的放电间隙(精微加工时约 5 μm)，工作液间隙即被击穿，电容上储存的能量瞬间释放而形成火花放电。待工具电极端面再次向上时，*RC* 线路又向电容器充电，至最高点时基本充满，电极端面下行时再次放电，这样周而复始，超声每振动一次，就能引发一次火花放电，每秒将有 4 万～5 万次超声频率的接近 100% 的有效火花脉冲放电率。工具电极、主轴头不用经常频繁进进退退伺服进给，只有当工件蚀除和工具电极损耗使电极间隙大于击穿间隙成为较长期的开路状态时，工具电极才伺服进给一步，大大提高了加工效率和稳定性。

编写：刘晋春（哈尔滨工业大学）
蒋亨顺（北京市电加工研究所）
山昌祝（北京凝华实业有限公司）
叶　军（苏州电加工机床研究所）
郭永丰（哈尔滨工业大学）

第 7 章　电火花成形加工工艺

电火花成形加工的对象主要是各种型腔模，包括锻模、压铸模、胶木模、塑料模、挤压模等，也包括一些型腔零件。它的加工比较困难，这是因为：均是盲孔加工，工作液循环和电蚀产物排除条件差，工具电极损耗后无法靠主轴进给补偿精度；金属蚀除量大；其次是加工面积变化大，加工过程中电规准的变化范围也较大；而且由于型腔复杂，电极损耗不均匀，对加工精度影响很大。因此，对型腔模的电火花加工，既要求蚀除量大，加工速度高，又要求电极损耗低，并保证所要求的精度和表面粗糙度。

型腔模电火花加工主要有单工具电极直接成形法、单工具电极平动（摇动）法、多工具电极更换法和分解工具电极加工法等。

1　电火花成形加工工艺方法

1.1　单工具电极直接成形法

单工具电极直接成形法是采用一个电极用一挡或几挡低损耗规准，沿着 Z 轴方向进行加工型腔的简单工艺方法。主要用于深度较浅的浅型腔模具的加工，如各种纪念章、证章的花纹模，在模具表面加工商标、厂标、中文外文字母，以及工艺美术图案、浮雕等。除此以外，也可用于加工无直壁的型腔模具或成形表面。因为浅型腔花纹模要求精细的花纹清晰，所以不能采用平动或摇动加工；而无直壁的型腔表面都与水平面有一倾斜角，工具电极在向下垂直进给时，对倾斜的型腔侧面也有一定的修整、修光的作用。无直壁的型腔在采用此方法加工时，垂直进给方向的数值 Z 与侧壁法线方向进给的数值 L 的关系如图 2.7-1 所示。可以公式表示为：

$$L = Z\sin\alpha$$

式中，α 为工具电极的斜边与垂直进给方向的夹角。当 L 大于前一规准修光要求的数值时，即可达到只靠垂直进给完成整个型腔修光的目的。由公式可知，侧壁越陡，越不利于使用这种加工方法。

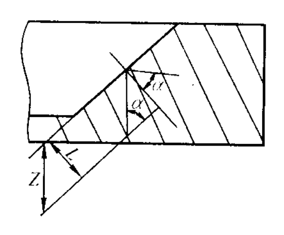


图 2.7-1　垂直进给方向数值 Z 与侧壁法线方向进给数值 L 的关系

1.1.1　浅型腔花纹模的电火花加工实例

(1) 工件名称

仕女头像纪念品冲压模（制作景泰兰用），如图 2.7-2 所示。

(2) 工件的技术要求

1) 工件材料　45 钢，调质处理 T235。

2) 工件形状　ϕ50 圆微凹球面、面积约 20 cm^2，此工件是工艺美术品模具，尺寸精度无严格要求，但要求型面清洁均匀，工艺美术花纹清晰。

3) 加工深度　1.3 mm；表面粗糙度 $R_a = 1 \sim 1.6$ μm。



图 2.7-2　仕女头像

4) 工件在电火花加工之前的工艺路线

① 下料　车外形，上、下面留磨量。

② 磨　上、下面，表面粗糙度 $R_a = 0.8$ μm。

(3) 工具电极的技术要求

1) 工具电极材料　纯铜。

2) 尺寸和形状　端面尺寸 ϕ50 圆球面微凸鼓形，面积约 20 cm^2。

3) 在电火花加工前的工艺路线

① 下料　刨、铣外形，留线切割夹持余量。

② 线切割　编制数控程序，切割成形。

③ 图案加工　按图纸雕刻或腐蚀。

④ 钳　将雕刻（或腐蚀）好的花纹电极用导电胶粘接在一块平板上，注意粘牢、粘平和电极的变形及导电性。图 2.7-3 为制作好的电极示意图。也可以采用背面用锡焊焊接电极柄的方法制作电极，但应防止产生变形。

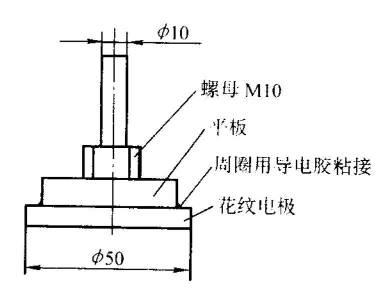


图 2.7-3　电极示意图

(4) 工艺方法

单工具电极直接成形法。

(5) 使用设备

北京凝华实业有限责任公司制造的 D7130 电火花成形机床和 NHP-NC-50A 单轴数控脉冲电源。

(6) 装夹、校正、固定

1) 工具电极　将工具电极装夹在主轴头的夹具上，以花纹平面周边的上平行面为基准，在 X 和 Y 两个方向校平，误差小于 0.05 mm，然后予以固定。

2) 工件　将工件平置于工作台平面，然后予以固定。

3) 工具电极与工件相对位置找正　以 ϕ50 mm 外圆为基准，用块规分别在 X、Y 两方向最大直径处的四点位置靠齐，然后锁紧工作台。

（7）加工规准

工件采用电脑控制的脉冲电源加工，是电火花加工领域中较为先进的技术。电脑部分拥有典型工艺参数的数据库，脉冲参数可以调出使用。调用的方法是借助脉冲电源装置配备的显示器进行人机会话，由操作者将加工工艺美术花纹的典型数据和加工程序调出，然后根据典型参数数据进行加工。

NHP-NC-50A 脉冲电源输出的加工规准和每挡规准的加工深度如表2.7-1所示。

表2.7-1　工艺美术花纹模具典型加工规准

脉宽/μs	间隔/μs	功放管数		平均加工电流/A	总进给深度/mm	表面粗糙度 R_a/μm	工件极性
		高压	低压				
250	100	2	6	8	0.9	8	负
150	80	2	4	3	1.1	6	负
50	50	2	4	1.2	1.2	3.5～4	负
16	40	2	4	0.8	1.24	2～2.5	负
2	30	2	2	0.5	1.27	1.6	正

（8）加工效果

1）加工表面粗糙度 R_a 值为 1～1.6 μm，且洁白均匀，符合设计要求。

2）花纹清晰，基本看不出有任何损耗模糊的表面。

1.1.2　电火花加工表面粗糙度样板实例

电火花加工后的表面粗糙度，目前仍按机械加工后表面粗糙度的测量办法来评定，正规情况下常用电动轮廓仪来测量，在要求不高、不严的情况下也可用电火花加工表面粗糙度样板（苏州电加工机床研究所发售）与电火花加工之后的表面进行目测对比，大致可以评定出 R_a 值为 0.4、0.8、1.6、3.2、6.3、12.6 μm 等六个等级。

正规的电火花加工表面粗糙度样板是在不锈钢表面上，用纯铜工具电极，选由粗到中、到精的不同的规准，加工面积为 20 mm×20 mm 多个不同表面粗糙度值的样块，经正式计量部门测定每块的表面粗糙度值，挑选出合用的 R_a 值分别约为 0.4～12.6 μm 六块，然后用电铸（快速电镀）的方法，复制拷贝出“阴模”，再由阴模复制拷贝出正式的电火花加工表面粗糙度样板。

在工厂、车间可以自行加工出电火花加工表面粗糙度样板供本单位人员目测比较。自制电火花加工表面粗糙度样板的方法如下。

（1）工件材料

最好用不锈钢板，以免日后生锈，用高碳钢或模具钢也可以，因为电火花加工后的表面有一定的防锈防腐蚀性能，但应事先淬火后再加工，以免日后在使用中划伤。

（2）工具电极

材料用纯铜块，其面积大小形状可自行决定，一般可为 15 mm×20 mm 左右，不宜过大或过小。加工前表面的粗糙度值应在砂纸上研磨至 R_a 为 0.4 μm 以下。电极用过一次之后，再次加工时仍应研磨光、平，尤其是表面粗糙度 R_a（0.4 μm）值较小的样板较难加工，电极更应研磨得又平又光。

（3）工具电极和工件的找正

应使电极的下表面和工件的上表面找得尽可能平行，否则要加工较长时间才能全面积进入火花放电状态。

（4）电火花加工规准的选择和操作要点

1）机床采用汉川机床厂生产的 HCD300，电源 MDV-105。

2）首先加工难加工的 R_a 值为 0.4 μm 的样板，然后再加工 R_a 值为 0.8 μm 的样板，最后加工 R_a 值为 12.6 μm 的样板。因为表面粗糙度愈差的样板愈易加工，工具电极的底面也容易修磨完整，甚至不修磨也行。

3）各表面粗糙度样板的加工参数选择如下：

目标 R_a 值为 0.4 μm 时，选脉宽 2 μs，峰值电流 2 A，脉间 10 μs，正极性，电极损耗大；

目标 R_a 值为 0.8 μm 时，选脉宽 4 μs，峰值电流 4 A，脉间 12 μs，电极损耗次之；

目标 R_a 值为 1.6 m 时，选脉宽 20 μs，峰值电流 5 A，脉间 20 μs；

目标 R_a 值为 3.2 μm 时，选脉宽 50 μs，峰值电流 10 A，脉间 30 μs；

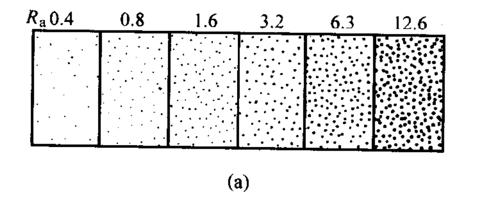
目标 R_a 值为 6.3 μm 时，选脉宽 200 μs，峰值电流 40 A，脉间 100 μs 负极性；

目标 R_a 值为 12.6 μm 时，选脉宽 1 200 μs，峰值电流 50 A，脉间 200 μs，负极性，电极损耗小。

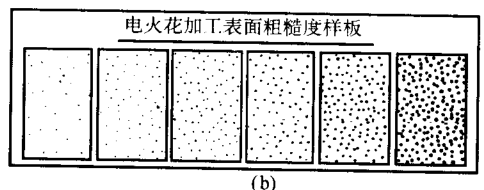
以上参数与不同的脉冲电源、冲油、抬刀、有否平动等情况有关，加工过程中应自行适当调整之。

4）冲油抬刀等参数可根据要求、情况而定。表面粗糙度值愈小，愈不易加工达到，此时必须有自动定时抬刀，而且抬刀高度应较大。所有加工，都应有侧向微冲油。表面粗糙度值较大时，可不用自动定时抬刀，因为此时放电爆炸排屑能力强，加工容易稳定。

5）加工完一批样板后，即可拿到计量室测量其表面粗糙度值，合格后用线切割切成小方块，按不同表面粗糙度值等级，用万能胶依次排列粘结在一块底板上，在各样板旁标注上相应的表面粗糙度值，就成为一副实用的表面粗糙度比较样板，如图2.7-4a）所示。另外，也可在经计量室测定表面粗糙度值，掌握了加工规准与表面粗糙度值的确切关系后，在一整块的不锈钢板上加工出不同表面粗糙度值的样板来，如图2.7-4b所示。



(a)



(b)

图2.7-4　电火花加工表面粗糙度比较样板

1.2　单工具电极平动（摇动）加工法

单工具电极平动（摇动）法在型腔模电火花加工中应用最广泛。它是采用一个电极完成型腔的粗、中、精加工的。首先采用低损耗（$\theta < 1\%$）、高生产率的粗规准进行加工，然后利用平动头作平面小圆运动，如图2.7-5所示，按照粗、中、精的顺序逐级改变电规准。与此同时，依次加大电极的平动量，以补偿前后两个加工规准之间型腔侧面放电间

隙差和表面微观不平度差，实现型腔侧面仿型修光，完成整个型腔模的加工。

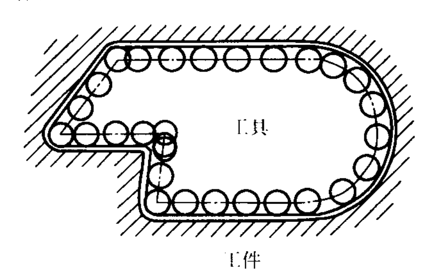


图 2.7-5　平动头扩大间隙原理图

如果不采用平动（摇动）加工，则如图 2.7-6a 所示，在用粗加工电极对型腔进行粗加工之后，型腔四周侧壁留下很大的放电间隙，而且表面粗糙度很差如图 2.7-6b 所示，此时再用精加工规准已无法进行加工，必要时只好更换一个尺寸较大的精加工电极如图 2.7-6c 所示，费时又费钱。如果采用平动（摇动）加工（如图 2.7-6d、e），只要用一个电极向四周平动，逐步地由粗到精改变规准，就可以较快地加工出型腔来。

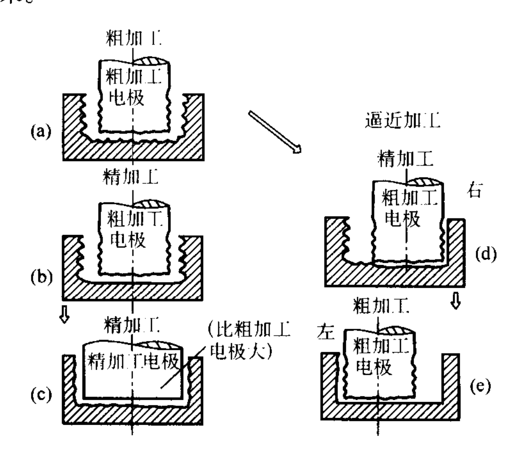


图 2.7-6　平动加工的优点

用平动头单工具电极平动法加工的最大优点是只需一个电极、一次装夹定位，便可达到 ± 0.05 mm 的加工精度，并方便了电蚀产物的排除，使加工过程稳定。其缺点是电极损耗后难以获得高精度的型腔模，特别是难以加工出清棱、清角的型腔；因为平动时，电极上的每一个点都按平动头的偏心半径作圆周运动，清角半径由偏心半径决定。此外，电极在粗加工中容易引起不平的表面龟裂状的积碳层，影响型腔表面粗糙度。为弥补这一缺点，可采用精度较高的重复定位夹具，将粗加工后的电极取下，经均匀修光后，再重复定位装夹，再用平动头完成型腔的加工，可消除上述缺陷。

完成这样一个周期后，随着加工规准的不断切换，逐渐增大平动值，使型腔最后达到完全修光的目的。

采用数控电火花加工机床时，是利用工作台按一定轨迹做微量移动来修光侧面的，为区别于夹持在主轴头上的平动头的运动，通常将其称作摇动。由于摇动轨迹是靠数控系统产生的，所以具有更灵活多样的模式，除了小圆轨迹运动外，还有方形、十字形运动，因此更能适应复杂形状的侧面修光的需要，尤其可以做到尖角处的“清根”，这是一般平动头所无法做到的。有关数控电火花加工机床的详细内容在本章第 3 节中详细介绍。

1.3　手动侧壁修光法

有些模具制造单位受资金等条件限制，没有平动头或数控电火花加工机床，无法实现平动、摇动加工。此时对简单形状（如方形）的型腔模具零件，可以采用手动侧壁修光法。它是利用移动工作台的 X 和 Y 坐标，配合转换加工规准，轮流修光各方向的侧壁。例如，在某型腔粗加工完毕后，采用中加工规准先将底面修出；然后，如图 2.7-7a 将工作台沿 X 坐标方向右移一个尺寸 d，修光型腔左侧壁；依次使电极相对工作台沿 Y 坐标前进方向移动 d，修光型腔后壁（见图 2.7-7b）；沿 X 坐标方向左 $2d$，修光型腔右壁（见图 2.7-7c）；再沿 Y 坐标后退方向称动 $2d$，修光型腔前壁（见图 2.7-7d），最后右移 $2d$ 修去缺角 5（见图 2.7-7e）

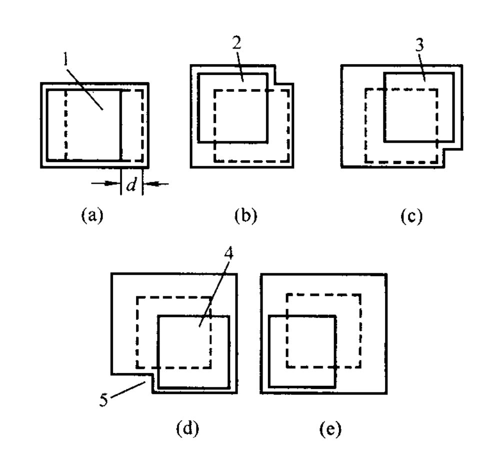


图 2.7-7　侧壁轮流修光法示意图
1—修左侧壁时工具电极位置；2—修前侧壁时工具电极位置；3—修右侧壁时工具电极位置；4—修后侧壁时工具电极位置；5—修完四个方向侧壁后修小角时工具电极位置

这种方法有两点注意事项：第一，各方向侧壁的修整必须同时依次进行，不可先将一个侧壁完全修光后，再退回较粗的加工规准修另一个侧壁，以免二次放电将已修好的侧壁损伤；第二，每次修完四个方向侧壁后，必然剩下一个小角未被修复（如图 2.7-7d）。因此，必须在修光 Y 轴上的最后一个侧壁后，将 X 坐标移至修第一个侧壁时的位置，将剩下的小角修出。必要时可减小 d 值，再修光一个循环。

这种加工方法的优点是可以采用单工具电极完成一个型腔的全部加工过程；缺点是操作烦琐，尤其在单面修光侧壁时，加工很难稳定，不易采取冲油措施，延长了中、精加工周期，而且无法修圆形轮廓的型腔。

1.4　分解工具电极法

分解工具电极法是单工具电极平动法和多工具电极更换法的综合应用。它工艺灵活性强，仿形精度高，适用于尖角窄缝、深孔、深槽多的复杂型腔模具加工。

根据型腔的几何形状，把工具电极分解为主型腔工具电极和副型腔工具电极分别制造，分别使用。主型腔一般完成去除量大、形状简单的主型腔加工（见图 2.7-8a）；副型腔工具电极一般完成去除量小、形状复杂（如尖角、窄槽、花纹等）的副型腔加工（见图 2.7-8b）。加工时，若主型腔采取平动工艺，则必须在完成主型腔加工后，令平动头回零（即平动前的原始位置），再更换副型腔工具电极进行副型腔加工。

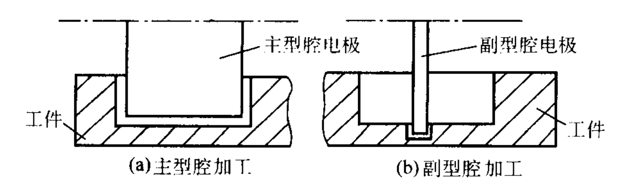


图 2.7-8 分解工具电极加工法示意图

此方法的优点是可以根据主、副型腔不同的加工条件，选择不同的加工规准，有利于提高加工速度和改善加工表面质量，同时还可以简化电极制造，便于修整电极。缺点是更换电极时主型腔和副型腔电极之间要求有精确的定位。

近年来，国外已广泛采用像加工中心那样具有电极库的多轴数控电火花机床，事先把复杂型腔分解为简单形状和相应的简单电极，编制好程序，加工过程中自动更换电极和转换规准，实现复杂型腔的加工。同时配合一套高精度辅助工具、夹具系统，可以大大提高电极的装夹定位精度，使采用分解电极法加工的模具精度大为提高。

1.5 多工具电极更换法

它是采用多个形状相同、尺寸有差异的工具电极依次更换加工同一个型腔。每个工具电极在整个型腔加工中分别承担着粗、中、精等不同的工艺使命，其使用的规准不同，放电间隙也不同，故电极的尺寸亦不同。这种加工方法的优点是仿型精度高，尤其可以较准确地加工尖角、窄缝等形状。但多工具电极更换法对工具电极的制造精度有严格的要求，既要求多个工具电极尺寸精度的一致性，又要求各工具电极间相对位置的尺寸差极为均匀；另外，还必须采取可靠的工艺措施，来确保在更换工具电极时的重复定位精度，要求定位装夹精度高。

多工具电极更换法主要应用的方面和注意事项如下。

1）在没有平动或摇动加工的条件时，可采用多工具电极更换法，利用工具电极的尺寸差异，来逐次弥补上一规准加工的间隙和修整其放电痕迹。一般用两个工具电极进行粗、精加工就可满足要求；当型腔模的精度和表面质量要求很高时，采用三个或更多个工具电极进行加工。例如过去盒式磁带、收录机、电视机等机壳的模具，都是用多个工具电极加工出来的。

2）除少数大型模具和零件外，一般多为一模多腔和相同零件的加工，为了提高加工效率和模具的制造精度，再采用单工具电极加工工艺就不能满足要求了，因为单工具电极加工如不用平动，只能修光底面；如用平动，若粗加工表面很粗，精修时间较长，且由于长时间的大电流加工，电极表面不可避免出现热疲劳裂纹，在平动加工中会将裂纹复制到工件表面，抛光后还会留下明显的波纹。如要保证表面质量，粗加工规准就要小，那样不但加工速度大减，而且电极损耗会加大，特别是边角损耗。由于边角处电场集中，工作液冲刷厉害，而且在修光时所需蚀除体积较其他表面要大得多，故即使所使用电规准的损耗可降低到 0.1%，也不能保证用单工具电极加工后型腔的边角清晰。但采用多工具电极加工情况就大不一样。今用两个相同工具电极加工两个型腔和一对粗精工具电极加工两个型腔进行对比：如型腔加工深度 20 mm，粗加工损耗为 0.2%，中精加工综合损耗为 2%，粗加工后余量为0.5 mm，用两个电极加工的型腔其深度尺寸差 = $(20-0.5)\times 0.002+0.5\times 0.02=0.049$ mm；而且粗精二个电极依次加工的型腔，其深度尺寸差分别为 $[0.5+(20-0.5)\times 0.002]\times 0.02=0.011$ mm 和 $[0.5+(20-0.5)\times 2\times 0.002]\times 0.02+0.011=0.023$ mm，因此精度明显提高一倍多，轮廓也会清晰得多。

3）当加工硬质合金模具时，由于没有低损耗电源的保证（一般采用铜钨合金电极时，损耗为 13% ~ 24%），需用三个以上的铜钨合金电极来保证加工精度。

在设计工具电极时，应根据对电火花加工中各阶段的损耗预测，来确定工具电极各部位的尺寸、形状和制造工艺。

在电火花加工中，工具电极尺寸和形状千变万化，工具电极各部分投入加工放电的顺序有先有后，工具电极上各点的总加工时间和损耗也不相同。因此，必须以此为依据，定量预测各部分的损耗值，图 2.7-9 是将其作为修正值来设计工具电极的尺寸和形状进行补偿修正的示意图。图中，实线为工具电极的理论形状、尺寸（即加工后的形状、尺寸）；虚线是工具电极经补偿修正的形状、尺寸（即加工前的形状、尺寸）。

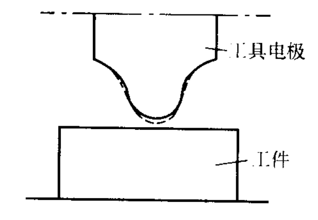


图 2.7-9 根据对工具电极损耗的预测，对工具电极的尺寸和形状进行补偿

实线—工具电极的理论形状、尺寸；
虚线—工具电极经补偿修正的形状、尺寸

2 单轴数控电火花成形加工工艺及加工实例

单轴电火花成形加工机床主进给轴为 Z 轴，以 Z 轴伺服加工为主。为了粗加工后修光型腔的侧壁，一般采用的工艺方法是：多工具电极法或单工具电极加平动装置进行平动加工。

2.1 对开模（无毛边模具）加工实例

对开模又称哈呋（Half）模，要求模具的分型面非常密合，没有毛边飞刺。

图 2.7-10 为使用与成形制品同样形状的电极，同时进行使上下两模的分型面合模加工。图 2.7-10a 是用“钢打钢”的电火花加工规准加工上下分型面，使分型面相互吻合，不易产生飞边毛刺；图 2.7-10b 为取下上模，装上电极，进行通常的放电加工；图 2.7-10c 为把电极装入下模贴紧后，取下电极柄；图 2.7-10d 为再装上上模，把电极极性改为上模被加工，直到上下模加工面全面对合；图 2.7-10e 为取掉电极部分，如此制作出的模具，压制塑料制品不出现毛边。

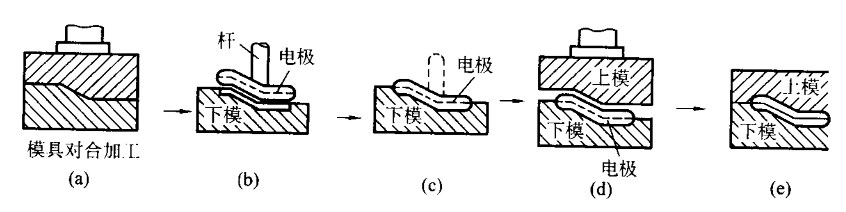


图 2.7-10 对开模加工步骤

2.2 洗衣机调节螺母注塑模加工实例

(1) 工件名称

洗衣机调节螺母注塑模。

(2) 工件技术要求

1) 工件材料　40Cr，调质处理。

2) 工件形状尺寸要求如图 2.7-11 所示。

3) 工件在电火花加工前的工艺路线

① 下料　刨、铣外形，上、下两面留磨量。

② 热处理　调质处理。

③ 磨　上、下两面。

④ 钳　钻铰导柱孔。

⑤ 车　精车 ϕ76 mm 料嘴孔，精车 ϕ22.4 mm 孔，预车型腔孔，单面留余量 2 mm。

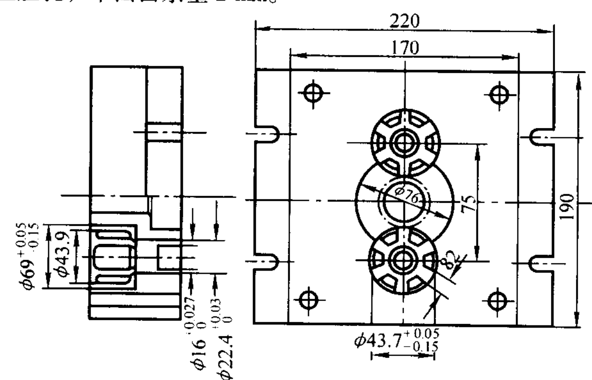


图 2.7-11　工件示意图

(3) 工具电极技术要求

1) 材料　纯铜。

2) 工具电极的形状尺寸要求如图 2.7-12a 所示，单边平动量按 0.45 mm 计算。

3) 在电火花加工之前的工艺路线

① 准备定位心轴 (图 2.7-12b)。

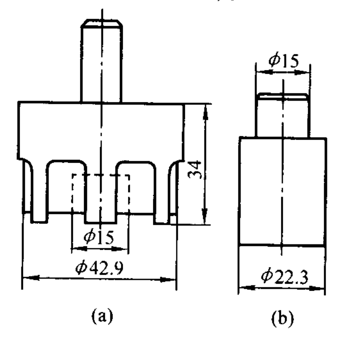


图 2.7-12　工具电极及定位心轴示意图

a) 车　各外圆柱面尺寸留 0.2 ~ 0.3 mm 磨量，钻中心孔。

b) 磨　精磨 ϕ15 mm 和 ϕ22.3 mm 孔，ϕ22.3 mm 孔与工件上对应孔配磨 (间隙 0.10 mm)。

② 车　工具电极各尺寸精车：ϕ15 mm 孔与心轴配车。

③ 铣　铣出各肋、槽。

④ 钳　修型，达图纸设计要求。

(4) 工艺方法

单工具电极平动修光法。

(5) 使用设备

北京凝华实业公司制造的 D7140 电火花成形机床和 NHP－60 A脉冲电源。

(6) 装夹、校正、固定

1) 工具电极　将工具电极装夹在主轴头的夹具上，以 ϕ42.9 mm 以外圆为基准校正 X、Y 两方向的垂直度，以 7.3 mm宽的筋的侧面为基准校正与 Y 轴的平行，校正后予以固定。固定后将定位心轴 ϕ15 孔装入电极对应孔。

2) 工件　将工件的基装面放在两个等高垫铁上，并将 2×ϕ22.4 mm 的孔让出等高垫铁，这样有利于加工过程中的排屑，用压板轻微固定。然后以模块基准侧面 X 为基准校正与 X 轴的平行，校正后予以固定。

3) 工具电极与工件相对位置找正　采用放电定位法对正工件与工具电极。对正时使用的部位为工件上 ϕ22.4 mm 孔和定位心轴上 ϕ22.3 mm 外圆。用小能量火花放电的放法进行找正 (使用规准：$t_i = 2\ \mu s$；$t_o = 20\ \mu s$；$i_e = 2$ A)，移动 X、Y 工作台，使 ϕ22.4 mm 孔四周放电火花均匀即找正完毕。找正后锁紧工作台。

(7) 加工规准 (如表 2.7-2)

(8) 加工效果

1) 一次加工成形，ϕ43.7 mm 尺寸的实测值为 ϕ43.78 mm，符合原设计要求。

2) 综合电极损耗小于 1%，型腔的棱角符合成型要求。

3) 加工表面粗糙度值 $R_a < 1\ \mu m$，可以直接使用，不需要钳工抛光。

表 2.7-2　洗衣机调节螺母注塑模加工规准

脉宽 /μs	间隔 /μs	功放管数		平均加工电流/A	总进给深度/mm	单边平动量/mm	表面粗糙度 R_a/μm	工件极性
		高压	低压					
1 000	200	2	4	6	1 ~ 2	0	20	负
1 000	100	2	12	18	27	0	> 25	负
256	50	2	8	8	27.20	0	12 ~ 13	负
256	50	2	6	4	27.30	0.24	9 ~ 11	负
64	20	2	5	3	27.45	0.30	7 ~ 8	负
64	20	2	4	2	27.48	0.345	5 ~ 6	负
2	10	2	4	1.5 ~ 2	27.50	0.38	3 ~ 4	正
2	10	2	2	1.5 ~ 2	27.50	0.415	< 2.5	正

2.3 锥齿轮精锻模加工实例

(1) 工件名称

锥齿轮精锻模。

(2) 工件技术要求

1) 工件材料　CrWMn。

2) 工件形状尺寸　齿形为渐开线；模数 $m = 12$；精度为尺寸公差 7 级 (见图 2.7-13a)。

3) 工件在电火花加工前的工艺路线

① 车　模块外形和型腔预孔。模块底面留 0.2 mm 磨量，型腔预孔直径留 0.5 mm 余量，锥度与齿底锥度一致。

② 热处理　淬火处理。

③ 磨　用平面磨床磨出模块底面。

(3) 工具电极的技术要求 (见图 2.7-13b) 和安装

1) 材料　纯铜。

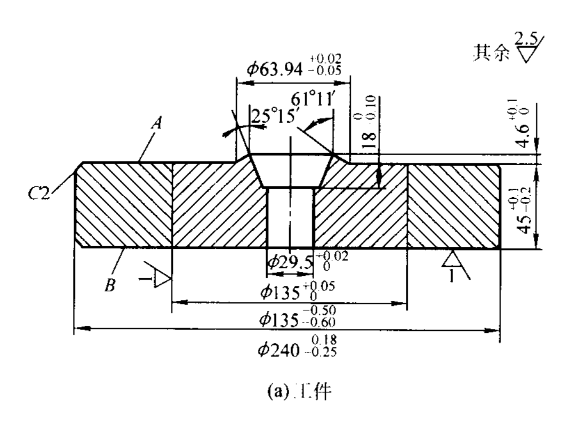
2) 工具电极在电火花加工的工艺路线

① 车　精车工具电极外形，锥度部分直径为齿顶直径尺寸。

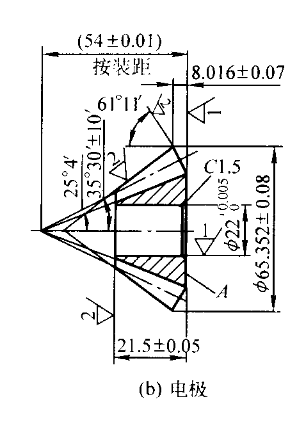
② 铣　铣斜齿，达公差等级 7 级。

③ 钳　修型抛光。

④ 工具电极的安装　图 2.7-14a 为电极接柄尺寸图，尺寸 ϕ20 mm 长 15 mm 用于电极的找正。将工具电极固定在电极接柄上，如图 2.7-14b 所示。

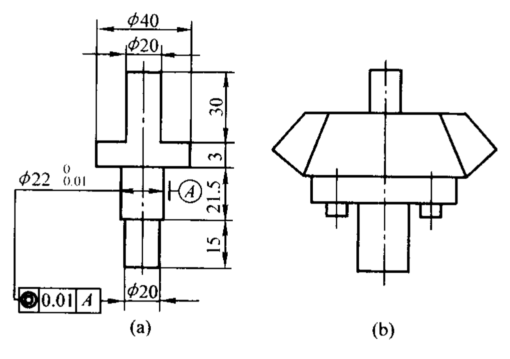


(a) 工件



(b) 电极

图 2.7-13　锥齿轮锻模毛坯和电极



(a)　　(b)

图 2.7-14　电极接柄及与工具电极的安装

(4) 工艺方法

单工具电极直接成形法。

(5) 使用设备

北京恒源电火花机床厂制造的 D7140 电火花成形机床和 JDS50 脉冲电源。

(6) 装夹、校正、固定

1) 工具电极　将电极接柄装夹在主轴头的夹具上，以 $\phi20$ mm 长 15 mm 为基准校正 X、Y 两方向的垂直度，校正后予以固定。也可用万能角度尺校正工具电极上的锥面，每相差 90°校正一点，共四点，其锥度角对称。

2) 工件　将工件的基准面平放在工作台上面两等高垫铁上固定，让出 $\phi29.5$ mm 孔在等高垫铁之外。

3) 工具电极与工件相对位置找正：利用机床的撞刀保护（接触感知）功能，采用复位法找正、对刀寻找最深点，将工具电极坐入预加工锥孔，从而对正工件和工具电极。

(7) 加工规准

锥齿轮精锻模型腔的加工规准如表 2.7-3 所示。对锥齿轮精锻用的工具电极（见图 2.7-13b）的说明：相邻齿距最大误差 0.025 mm；齿距最大积累误差 0.040 mm。A 面对 $\phi22^{+0.005}_{0}$ mm 垂直度 < 0.01 mm。接触区沿齿长、齿高方向 ≥ 80%，且靠小端将齿形角修至 22°。

表 2.7-3　锥齿轮精锻模型腔的加工规准

脉宽 /μs	间隔 /μs	功放管数		平均加工电流/A	总进给深度/mm	表面粗糙度 R_a/μm	工件极性
		高压	低压				
1 024	200	8	24	26	11	> 25	负
1 024	200	8	12	15	12	> 25	负
512	200	8	8	12	14	20 ~ 22	负
256	100	8	4	8	15.5	9 ~ 11	负

续表 2.7-3

脉宽 /μs	间隔 /μs	功放管数		平均加工电流/A	总进给深度/mm	表面粗糙度 R_a/μm	工件极性
		高压	低压				
中精加工低损耗规准 64	2	4	4	1.5	16	4.5	负
2	20	8	24	1.5	16.07	2.5	正

(8) 加工效果

1) 因采用单工具电极直接成形法，靠垂直进给方向的加工对各锥面进行加工，所以可不采用平动工艺，避免了破坏渐开线齿形。

2) 采用了低损耗工艺规准，尤其在采用中精加工低损耗规准以后，表面粗糙度 R_a 值达到 4.5 μm 时，仍获得小于 1% 的相对损耗指标，为保证 7 级尺寸公差的加工精度奠定了基础。

3) 仅用了 0.07 mm 的进给深度精修，使工件型腔的表面粗糙度 R_a 值达到 2.5 μm 的指标。经电火花加工后，型腔部分无需进行任何钳工修型或抛光，可直接使用。

2.4　塑料叶轮注塑模加工实例

(1) 工件名称

塑料叶轮注塑模。

(2) 工件（模具）的技术要求

1) 工件材料　45 钢。

2) 工件的形状　在 $\phi120$ mm 圆范围内，以其轴心作为对称中心，均匀分布六片叶片的型槽。槽的最深处尺寸为 15 mm；槽的上口宽 2.2 mm；槽壁有 0.2 mm 的脱模斜度（约 30′）。参见图 2.7-15 电极图。在工件的中心有一个 $\phi10^{+0.03}_{0}$ mm 孔。

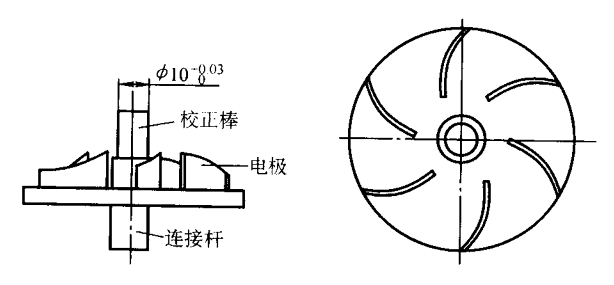


图 2.7-15　叶轮工具电极

3) 工件在电火花加工前的工艺路线

① 车　精车 $\phi10^{+0.03}_{0}$ 孔和其他各尺寸，上、下两面留

磨量。

② 磨 精磨上、下两面。

③ 钳 在加工的6个叶片部位，各钻一个 $\phi1$ mm 的冲油孔，加工时使用下冲油。

(3) 工具电极的技术要求

1) 材料 纯铜。

2) 分别用紫铜材料加工6片成形工具电极，然后镶嵌或焊在一块固定板上（如图 2.7-15）。电极固定板中心加工一个 $\phi10^{+0.03}_{0}$ mm 孔，与工件中心孔相对应。

3) 电火花加工之前的工艺路线

① 用线切割或铣 加工6个叶片电极。

② 车和线切割 车电极固定板外形尺寸和 $\phi10^{+0.03}_{0}$ mm 孔，线切割加工6个叶片电极固定槽。

③ 钳 拼镶或焊接工具电极并修型、抛光。

(4) 工艺方法

单工具电极平动修光法。

(5) 使用设备

泰安生建电火花机床厂制造的 D7140 电火花成形机床和 JF80 脉冲电源。

(6) 装夹、校正、固定

1) 准备定位心轴 用45圆钢车长为 40 mm、直径为 $\phi10^{+0.03}_{-0.01}$ mm 定位心轴作为校正棒，结构见图 2.7-15。

2) 工具电极 将电极接柄装夹在主轴头的夹具上，以各叶片电极的侧壁为基准校正后予以固定。

3) 工件 将工件平置于工作台面。移动 X、Y 坐标轴，对准心轴校正棒与工件上对应孔，直到能自由插入为止。将工件夹紧后抽出定位心轴。

(7) 加工规准

加工规准如表 2.7-4 所示。刚开始时，由于实际加工面积很小，应减小峰值电流，以防电弧烧伤。

(8) 加工效果

1) 因中精加工采用了低损耗规准，工具电极综合损耗约为 1%～2%。

表 2.7-4 塑料叶轮注塑模加工规准

脉宽 /μs	间隔 /μs	功放管数		平均加工电流/A	总进给深度/mm	单边平动量/mm	表面粗糙度 R_a/μm	极性
		高压	低压					
512	200	4	12	15	12.5	0	>25	负
256	200	4	8	10	14.5	0.20	12～13	负
中精加工低损耗规准 128	10	4	4	2	14.8	0.30	7～8	负
64	10	4	4	1.3	15	0.36	3～4	负
2	40	8	24	0.8	15.1	0.40	1.5～2	正

2) 加工表面粗糙度 R_a 值为 1.5～2 μm，无需修型抛光，可以直接使用。

3) 加工后，槽孔壁有 0.2 mm 的脱模斜度，符合设计要求。

2.5 高精度压胶型腔模加工实例

高精度压胶型腔模具表面粗糙度 R_a 值应达 2.5～1.25 μm，由上模和下模等零件所组成，产品是胶木转轴，一般的零件如手柄旋钮等尺寸精度要求不高，只要外观光洁漂亮即可，而转轴精度的高低直接影响转轴的工作情况，因此转轴不仅要求外观好看，还要对其尺寸精度有所要求。从上模图 2.7-16 和下模图 2.7-17 中可以看出：模具型腔的复杂程度属一般，但尺寸公差较严。该模具的加工有两种方案：① 改变模具结构，使型腔拼合而成，然后用机械方法进行加工，此种方案结构复杂，加工周期长；② 采用电火花加工型腔一次成形。众所周知，型腔尺寸精度取决于电极的尺寸精度。加上本模具是一模两腔。若采用电火花成形加工模具，重点就要提高电极装夹定位等精度，才能保证模具型腔的精度。

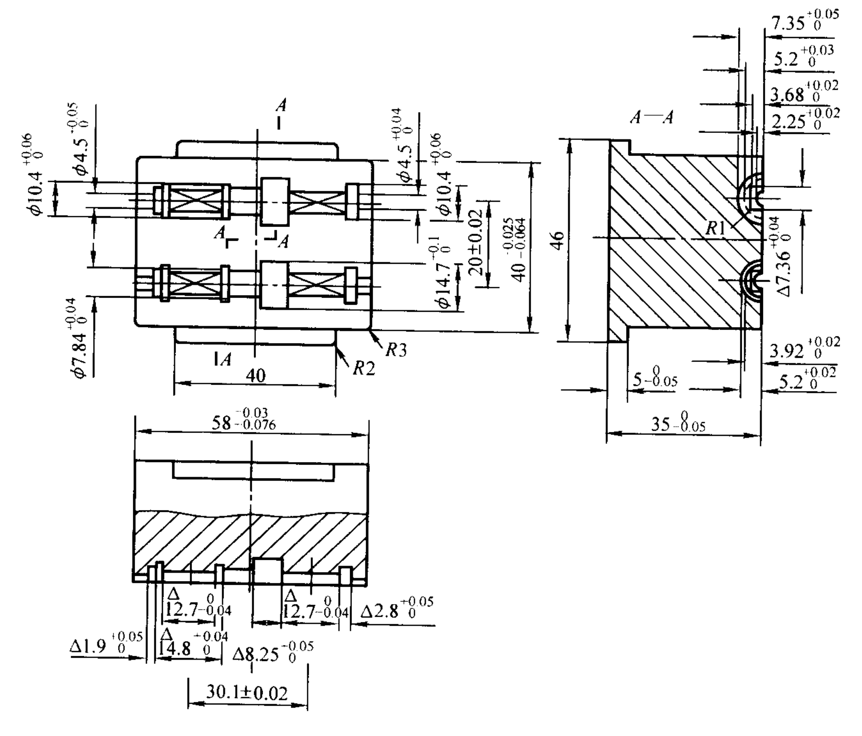


图 2.7-16 上模图

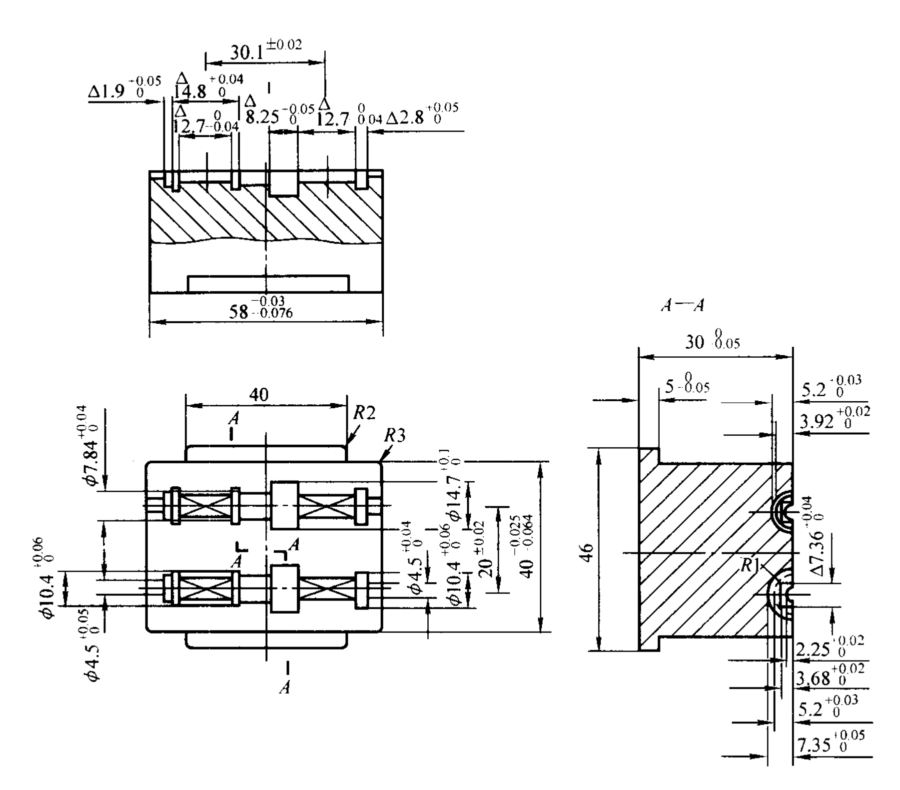


图 2.7-17　下模图

(1) 工具电极的设计和制造要求

工具电极材料选用纯铜，工具电极的单边缩放量为 0.15 mm，工具电极的加工工序是车、铣、刨、钻及钳工修正。工具电极的尺寸精度要求较高，详见工具电极图 2.7-18 所示。由图可以看出：30.1 mm ± 0.02 mm 为两边 $13^{+0.02}_{0}$ mm 尺寸的中心平分线之间的距离，$7.06_{-0.02}^{0}$ mm 是工具电极的方形尺寸。这两个尺寸除了控制模具的型腔尺寸外，还要装到电极的固定板里作定位用。因此，工具电极的每一尺寸都应该严格控制，一定要达到图样所规定的要求。

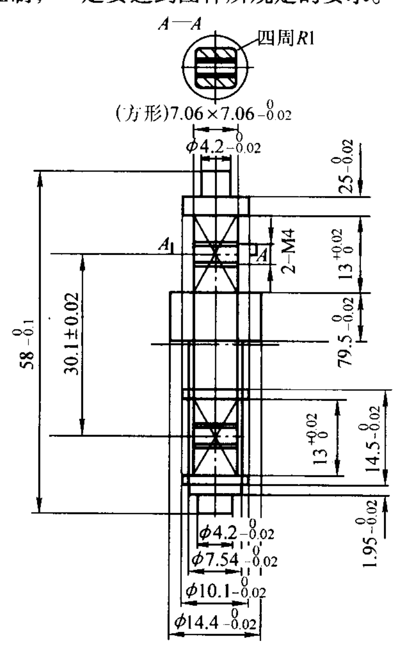


图 2.7-18　工具电极图

两只工具电极进行组装，如图 2.7-19 所示。工具电极 1 放到电极固定板 2 中，固定板应按图样要求严格检查，必须达到图样上所规定的技术要求，然后用螺钉 3 紧固。电火花加工用工装夹具是重要的，特别是加工高精度的模具型腔尤其如此，所以设计制造工装夹具时，既要简单又要实用，尽量考虑制造方便。如加工这副模具的夹具只有一个零件（电极固定板），而且制造也很方便，用刨、磨两道工序就能解决问题。从电极固定板 2 中可以看出，20 mm ± 0.05 mm 及 30.1 mm ± 0.02 mm 尺寸确定了两个工具电极的位置尺寸，$7.06_{-0.002}^{0}$ mm 尺寸（见图 2.7-18）保证了与电极的配合尺寸。至于型腔的尺寸，用平动方法逐步扩大间隙，是完全能达到模具所要求的尺寸精度和表面粗糙度的。但是平动头的仿型精度一定要好，平动头的回零精度应不超过 0.02 mm。

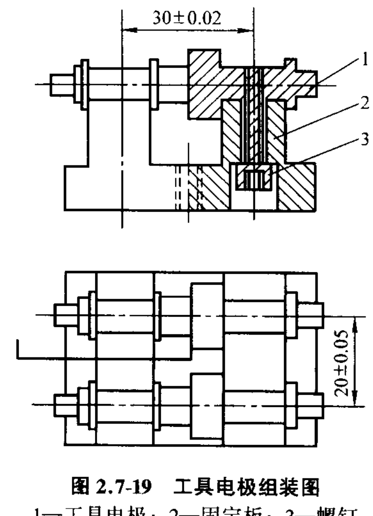


图 2.7-19　工具电极组装图
1—工具电极；2—固定板；3—螺钉

(2) 规准的转换及加工方法

高精度压胶型腔模具采用中精加工晶体管分组脉冲低损耗电源加工，电规准的转换及加工步骤详见加工规准转换表 2.7-5。

表 2.7-5　加工规准转换表

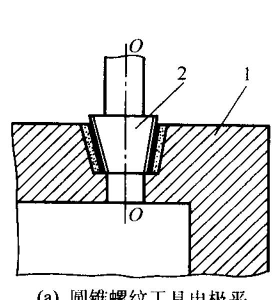
规准	高压/V	低压/V	大脉宽/μs	小脉宽/μs	大停歇/μs	小停歇/μs	高压管/只	低压管/只	单边平动量/mm	进给量/mm
1	300	80	320	160	30	2	1	6	0	7.35
2	300	80	320	60	60	2		4	0.11	7.46
3	300	80	120	30	40	2	1	4	0.125	7.47
4	300	80	120	10	40	2		2	0.135	7.48

根据型腔模具制造的工艺特点，型面要放余量，以供钳工修正时用。上模加工好以后，拧出螺钉3，把电极1旋转180°，再拧紧螺钉，用同样的电规准加工下模，上下模加工好以后，经检查应完全符合图样要求。

注：此型腔模如果在具有 X、Y 轴数显功能的机床上加工，则可用单个电极加工后根据数显移过一段距离装夹找正，很容易保证 ±0.01 mm 的定位精度，减少了用两只电极靠固定板组装等麻烦。如果是三轴数控机床，则加工更为简单可靠，由此可见，数显和数控机床设备的优越性。

2.6　用平动（摇动）功能加工内螺纹

有时淬火前遗漏攻螺纹孔，淬火后需补攻；或需在硬质合金上加工内螺纹，这时可采用平动头或工作台摇动来加工内螺纹（包括内锥螺纹）。图 2.7-20a 为用小于底孔的圆锥螺纹工具电极平动扩张轨迹加工内锥螺纹，图 2.7-20b 为平动（摇动）逐步扩张加工内螺纹的原理。其原理为工具电极2外圆周上的各点 P_1、P_2、P_3、…、P_n 等任何点都与工件1内圆周上的各对应点 P'_1、P'_2、P'_3、…、P'_n 在平动时逐点对应，随着工具平动轨迹逐步扩张而将工具表面的形状复印到工件内壁上去，就像“摆动辗压”那样。



(a) 圆锥螺纹工具电极平动扩大式加工内锥螺纹　　(b) 平动扩大式加工内螺纹原理

图 2.7-20　平动加工内螺纹

同样原理，也可在内侧壁表面上加工花纹、商标、字母等。

平动扩张式加工内螺纹有几个特点。

1）放电区域仅局限于螺纹电极的外缘和工件相近点的小窄条面积，由于工具电极和工件间有相对平动，排屑排气条件比较好，能够实现电规准的连续转换，易于得到较好的加工表面粗糙度。

2）螺纹电极制造简单，只需保持牙形和螺距准确以及轴向平直，对螺纹中径尺寸等精度要求不高，因为可用调节平动半径来控制加工尺寸。只要偏心量可调范围足够大，各种螺距的螺纹都可加工，不需要变换运动系统的传动比，而且不受牙形、旋向、米制、英制、圆柱形、圆锥形和螺纹头数等类型的限制。此外，不论对于穿通或盲孔型螺纹均可加工。

利用同一原理，可用平动尤其是摇动加工方法加工小模数的内齿轮（直齿轮、锥齿轮或斜齿、螺旋面齿轮等）。实际上只要有足够大的摇动半径，就可以不用 C 轴加工出内螺旋斜齿轮。不过由于齿轮的节圆半径发生了变化，已不是正确的啮合状态，所以齿形表面会失真，只能用于加工精度不高的齿轮。

3　多轴数控电火花成形加工工艺及加工实例

目前我国生产的数控电火花机床，有单轴数控（主轴 Z 向、垂直方向伺服，如本章第2节）、三轴数控（主轴 Z 向、水平轴 X、Y 方向伺服）和四轴数控（主轴能数控回转及分度，称为 C 轴，加 Z、X、Y 轴）。如果在工作台上加双轴数控回转台附件（绕 X 轴转动的称 A 轴，绕 Y 轴转动的称 B 轴），这样就称为六轴数控机床。如果主轴只进行普通旋转运动，没有数控分度功能，则称作 R 轴，此类多轴数控机床可以实现近年来出现的用简单电极（例如棒状电极）展成法加工复杂表面，它是靠旋转的工具电极（旋转可以使电极损耗均匀和促进排屑）和工件间的数控运动及正确的编程来实现的，不必制造复杂的工具电极，就可以加工复杂的模具或零件，大大缩短了生产周期和展示出数控技术的“柔性”及适应能力。

图 2.7-21a 为基本摇动模式（可参见3.3节），图 2.7-21b 为工作台变半径圆形摇动，主轴上下数控联动，可以修光或加工出锥面、球面。由此可见，数控电火花加工机床更适合单工具电极法加工。另外，可以利用数控功能加工出以往普通机床难以或不能实现的零件。如利用简单电极配合侧向（X、Y 向）移动、转动、分度等进行多轴控制，可加工复杂曲面、螺旋面、坐标孔、侧向孔、分度槽等，如图 2.7-21c 所示。

数控电火花成形加工（NCEDM）与普通电火花成形加工（SEDM）工艺相比不仅仅是省力，而主要是大大扩展了应用范围，保证了加工质量和缩短了交货期。NCEDM 与普通 SEDM 的区别在于前者有两项主要功能，即自动（AUTOMATIC）和自主（AUTONOMIC）。自动的内容包括自动编程和自动设定加工规准、自动定位、自动电极交换、自动的成形和平动加工、自动检测。自主即 NCEDM 的人工智能，适应加工状况的变化随时优化加工参数，保证加工的安全和高效率，减少了对操作者的依赖和人为的差错。另外，三轴数控机床使得加工进给的方位不再是唯一的，加工可以在除安装面之外的任意面上进行（即五面体加工）；而且，传统的单方向进给平动修侧面方式也随之被扩展为可以在任意平面上多轨迹平动加工，这种功能被广义称为摇动。

多轴 NCEDM 先进的工艺方法主要体现在：①多坐标系设定技术；②自动定位技术和在机检测技术；③多功能、多方式的摇动技术；④多种加工方式技术（单轴水平加工、两轴联动平面加工、三轴联动三维空间加工、任意轴与 C 轴联动加工、反拷贝加工、轨迹加工等）。下面主要以北京迪蒙斯巴克工控技术有限公司生产的 CNC－B35 精密数控电火花成形加工机床为例对各种技术进行介绍。

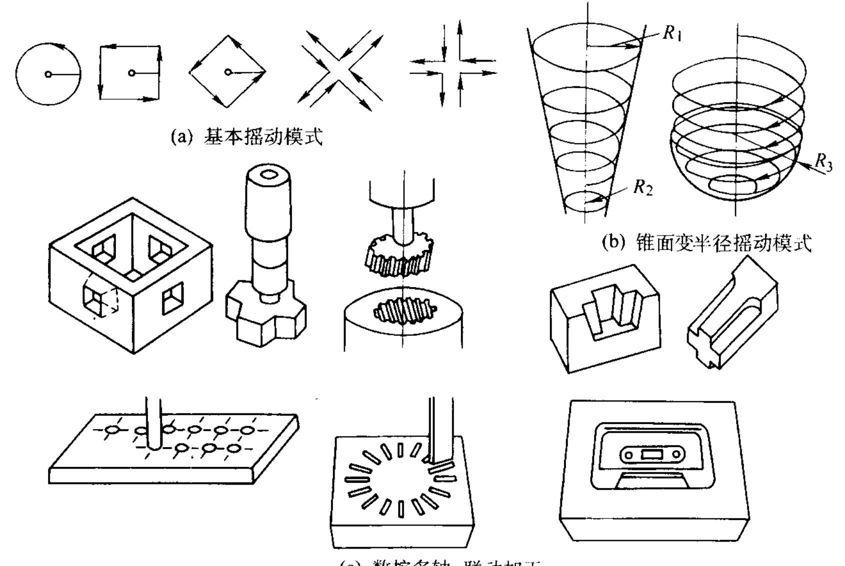


图 2.7-21　几种典型的摇动模式和加工实例

R_1—起始半径；R_2—终了半径；R_3—球面半径

3.1　NCEDM（数控电火花加工）的多坐标系设定技术

多坐标系设定技术：设定当前加工所处的坐标系和具体坐标数值以及其他坐标系的数值。一般有6～8个坐标系和一个机械坐标系，可方便地用于多工件、多型腔的加工、检测和数据对比，为编制复杂程序提供了方便。数控代码指令见3.4节。

3.2　NCEDM先进的自动定位技术和在机检测技术

三轴数控电火花成形机床最主要的功能之一就是定位、测量功能，这两者是相互关系密不可分的，是左右工件加工精度最重要的因素。该功能使得精密多型腔模块的加工以及多工具电极法加工复杂型腔的重复精度得以保证，更重要的是轻而易举地保证了型腔的合模精度。

（1）先进的自动定位技术

该项技术的主要内容有自动端面定位、自动柱中心定位、自动角定位、自动孔中心定位、任意三点定位、放电位置定位等，分别设置了简单和详细文件，并可对输入好的文件进行保存，便于重复调用。一般数控机床都将各种定位功能作成模块，只输入基本参数，就可完成自动定位；也可编制子程序，在加工程序中调用，完成定位、加工、测量的全过程。下面分别介绍各种定位功能的使用。

1）自动端面定位　是指使工具电极从任意方向与工件相接触，测出端面位置的定位方法，见图2.7-22a。如采用模块方法，仅输入移动轴、方向、测定后坐标0设置（是/否）、测定后移动距离就可完成自动定位，移动到指定的位置。如果采用编子程序方法，先将工具电极移到需定位的工件上方（距端面1 mm左右），在H002处输入定位后 Z 轴距端面的数值，执行程序就可自动完成定位，其动作见图2.7-22b。具体程序编制（参见表2.7-8）为：

N0001；（子程序名称0001号）

;

H000 = + 00000000　H001 = + 00000000　H002 = + 00001000　H003 = + 00000000；（H002：Z 轴距端面的量）

M98 P1400；（调用子程序）

M02；（程序结束）

N1400 G90 G54；（调用子程序名称1400号，确定坐标系G54和绝对坐标指令）

G80 Z－；（沿 Z 轴－方向移动到可执行接触感知处）

G92 Z；（设定 Z 坐标值为0）

M05 G00 Z + H002；（忽视接触感知移动到 Z 轴＋设定的位置）

M99：（子程序结束）

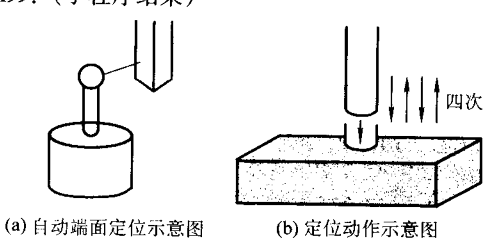


图 2.7-22　自动端面定位

2）自动柱中心定位　是指先测量出工件或基准球的前后左右的宽度，以此为基准测出工件或基准球的中心位置的定位方法，见图2.7-23a。如采用模块方法，仅输入测定次数（1～3次）、测定值允许误差、Z 轴接触感知动作选择（是/否）、接触感知后反转值、快进量、测定后坐标0设置（是/否）、测定子直径（d）、测定后移动距离就可自动完成定位，移动到指定的位置，同时给出 X、Y 两方向的数值和几次测量的误差值。如采用编制子程序方法，将工具电极移到需定位的工件上方（距端面1 mm左右），目测 X、Y 两方向基本对中，给H指令赋值，执行程序就可自动完成定位，其动作见图2.7-23b。程序编制有两种：一种是形状为正方形或圆形，X、Y 轴快进量一样；另一种则是不规则形状，X、Y 轴快进量不一样，现以第一种为例编制具体程序为：

N0002；（子程序名称）

;

H000 = + 00010000　H001 = + 00010000　H002 = + 00000500　H003 = + 00000002　H004 = + 00005000；

（H000：X 轴快进量；H001：Y 轴快进量；H002：X、Y、Z 轴快速回退移动量；H003：程序执行次数；H004：Z 轴正方向快进量）

M98 P1500 LH003；（调用子程序）

M02；（程序结束）

N1500 G90 G54；（调用子程序名称1500号，确定坐标系



G54 和绝对坐标指令）

G80 Z-；（沿 Z 轴负方向移动到可执行接触感知处）

G92 XYZ；（设定 XYZ 坐标值为 0）

M05 G00 X+H002；（忽视接触感知，用增量法移动到 X 轴+设定的位置）

X+H000；（移动到 X 轴+设定的位置）

Z-H004；（移动到 Z 轴-设定的位置）

G80 X-；（沿 X 轴负方向移动到可执行接触感知处）

G91 M05 G00 X+H002；（忽视接触感知，用增量法移动到 X 轴+设定的位置）

G90 G58 G92 X；（在 G58 绝对坐标系下，设定 X 坐标值为 0）

G54 G00 Z+H002；（在 G54 坐标系下，移动到 Z 轴+设定的位置）

X-H000；（移动到 X 轴-设定的位置）

Z-H004；（移动到 Z 轴-设定的位置）

G80 X+；（沿 X 轴正方向移动到可执行接触感知处）

G91 M05 G00 X-H002；（忽视接触感知，用增量法移动到 X 轴-设定的位置）

G90 G00 Z+H002；（用绝对法移动到 Z 轴+设定的位置）

G58 G82 X；（在 G58 坐标系下，X 轴移动到原点与现在位置的一半处）

G80 Z-；（沿 Z 轴负方向移动到可执行接触感知处）

G54 G92 XYZ；（在 G54 坐标系下，设定 XYZ 坐标值为 0）

M05 G00 Z+H002；（忽视接触感知移动到 Z 轴+设定的位置）

Y+H001；（移动到 Y 轴+设定的位置）

Z-H004；（移动到 Z 轴-设定的位置）

G80 Y-；（沿 Y 轴负方向移动到可执行接触感知处）

G91 M05 G00 Y+H002；（忽视接触感知，用增量法移动到 Y 轴+设定的位置）

G90 G58 G92 Y；（在 G58 绝对坐标系下，设定 Y 坐标值为 0）

G54 G00 Z+H002；（在 G54 坐标系下，移动到 Z 轴+设定的位置）

Y-H001；（移动到 Y 轴-设定的位置）

Z-H004；（移动到 Z 轴-设定的位置）

G80 Y+；（沿 Y 轴正方向移动到可执行接触感知处）

G91 M05 G00 Y-H002；（忽视接触感知，用增量法移动到 Y 轴-设定的位置）

G90 G00 Z+H002；（用绝对法移动到 Z 轴+设定的位置）

G58 G82 Y；（在 G58 坐标系下，Y 轴移动到原点与现在位置的一半处）

G80 Z-；（沿 Z 轴负方向移动到可执行接触感知处）

G54 G92 XYZ；（在 G54 坐标系下，设定 XYZ 坐标值为 0）

M05 G00 Z+H002；（忽视接触感知，移动到 Z 轴+设定的位置）

M99；（子程序结束）

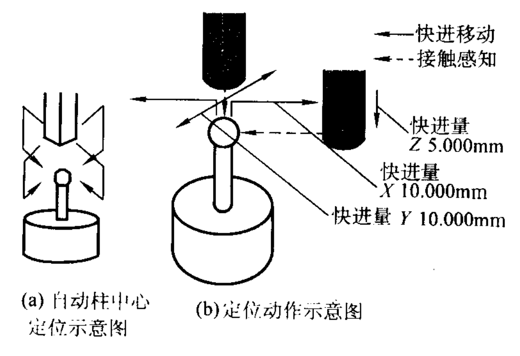


图 2.7-23　自动柱中心定位

3）自动角定位　是指先检查出工件的两个侧面，依次进行角定位的定位方法，见图 2.7-24a。如采用模块方法，仅输入测定次数（1～3 次）、测定值允许误差、角序号、接触感知后反转值、快进量、测定后坐标 0 设置（是/否）、测定后移动距离就可自动完成定位，移动到指定的位置。如采用编制子程序方法，将工具电极移到需定位的工件上方（距端面 1 mm 左右），目测 X、Y 两方向距定位角的距离基本相等，给 H 指令赋值，执行程序就可自动完成定位，其动作见图 2.7-24b。以第 1 象限为例具体程序为：

N0003；（子程序名称）

；

H000=+00015000 H001=00005000 H002=+00000000；

H003=+00000000 H004=+00000000 H005=+00001000；（H000：X、Y 正方向快速移动量；H001：Z 轴负方向快速移动量；H002：端面定位后 X 轴负方向移动量；H003：端面定位后 Y 轴负方向移动量；H005：X、Y、Z 快速回退移动量）

M98 P1600；（调用子程序）

M02；（程序结束）

N1600 G90 G54；（调用子程序名称 1600 号，确定坐标系 G54 和绝对坐标指令）

G80 Z-；（沿 Z 轴负方向移动到可执行接触感知处）

G92 XYZ；（设定 XYZ 坐标值为 0）

M05 G00 Z+H005；（忽视接触感知，移动到 Z 轴+设定的位置）

X+H000；（移动到 X 轴+设定的位置）

Z-H001；（移动到 Z 轴-设定的位置）

G80 X-；（沿 X 轴负方向移动到可执行接触感知处）

G58 G92 X；（在 G58 坐标系下，设定 X 坐标值为 0）

M05 G00 X+H005；（忽视接触感知，移动到 X 轴+设定的位置）

G54 G00 Z+H005；（在 G54 坐标系下，移动到 Z 轴+设定的位置）

X；（移动 X=0 的位置）

Y+H000；（移动到 Y 轴+设定的位置）

Z-H001；（移动到 Z 轴-设定的位置）

G80 Y-；（沿 Y 轴负方向移动到可执行接触感知处）

G58 G92 Y；（G58 坐标系下，设定 Y 坐标值为 0）

M05 G00 Y+H005；（忽视接触感知，移动到 Y 轴+设定的位置）

G54 G00 Z+H005；（在 G54 坐标系下，移动到 Z 轴+设定的位置）

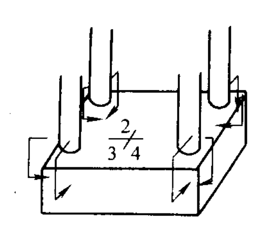
G58 G00 X-H002 Y-H003；（在 G58 坐标系下，移动到 X 轴-设定的位置、Y 轴-设定的位置）

G54 G92 XY；（在 G54 坐标系下，设定 XY 坐标值为 0）

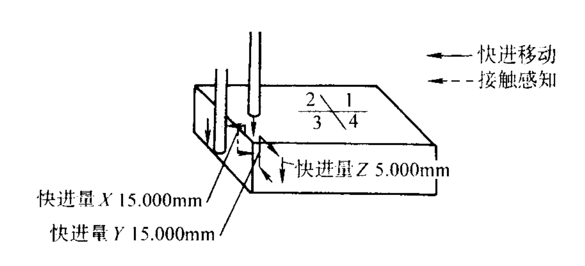
M99；（子程序结束）

4）自动孔中心定位　是指先测量出工件孔中的前后左右的尺寸，并以此为基础测出孔的中心位置的定位方法，见图 2.7-25a。如采用模块方法，仅输入测定次数（1～3 次）、测定值允许误差、接触感知后反转值、快进量、测定后坐标 0 设置（是/否）、测定子直径（d）、测定后移动距离就可自动完成定位，移动到指定的位置，同时给出 X、Y 两方向的数值和几次测量的误差值。如采用编制子程序方法，将工具电极移到需定位的孔内，目测 X、Y 两方向基本对中，给 H 指令赋值，执行程序就可自动完成定位，其动作见图 2.7-25b。程序编制有两种：一种是孔的形状为正方形或圆形，X、Y 轴快进量一样；另一种是不对称孔则快进量不一样，现以第一种为例具体程序为：





(a) 自动角定位示意图



(b) 定位动作示意图

图 2.7-24 自动角定位

N0004；(子程序名称)

；

H000 = + 00000000　H001 = + 00000000　H002 = + 00000000　H003 = + 00000000；　(H000：X 轴快进量；H001：Y 轴快进量；H002：X、Y 快速回退移动量：H003：程序执行次数)

M98 P1700 LH003；(调用子程序)

M02；(程序结束)

N1700 G90 G54 G92XY；(调用子程序名称1700号，确定坐标系G54和绝对坐标指令)

G00 X + H000；(移动到 X 轴 + 设定的位置)

G80 X + ；(沿 X 轴正方向移动到可执行接触感知处)

G58 G92 X；(在G58坐标系下，设定 X 坐标值为0)

M05 G00 X − H002；(忽视接触感知，移动到 X 轴 − 设定的位置)

G54 G00 X − H000；(在G54坐标系下，移动到 X 轴 − 设定的位置)

G80 X − ；(沿 X 轴负方向移动到可执行接触感知处)

M05 G58 G82 X；(忽视接触感知，在G58坐标系下，X 轴移动到原点与现在位置的一半处)

G54 G00 Y + H001；(在G54坐标系下，移动到 Y 轴 + 设定的位置)

G80 Y + ；(沿 Y 轴正方向移动到可执行接触感知处)

G58 G92 Y；(在G58坐标系下，设定 Y 坐标值为0)

M05 G00 Y − H002；(忽视接触感知，移动到 Y 轴 − 设定的位置)

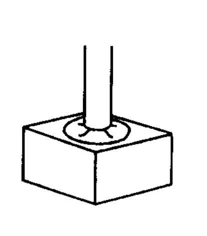
G54 G00 Y + H001；(在G54坐标系下，移动到 Y 轴 + 设定的位置)

G80 Y − ；(沿 Y 轴负方向移动到可执行接触感知处)

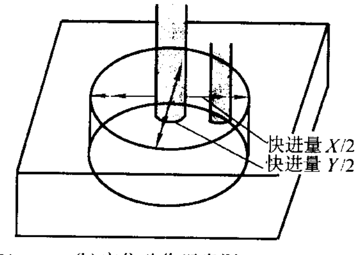
M05 G58 G82 Y；(忽视接触感知，在G58坐标系下，Y 轴移动到原点与现在位置的一半处)

G54 G92 XY；(设定 XY 坐标值为0)

M99；(子程序结束)



(a) 自动孔中心定位示意图



(b) 定位动作示意图

图 2.7-25 自动孔中心定位

5) 任意三点定位　是指对于用柱中心、孔中心等定位方法无法测量的特殊形状的工件中进行定位的方法，见图2.7-26。任意三点定位包括手动、自动、内径、外径不同的组合方法。以任意三点自动、内径的定位方法为例进行说明。采用模块方法，输入自动、内径、测定次数（1～3次)、测定值允许误差、快进量 (r)、Z 轴下降量、接触点角度第1点（θ）第2点（τ）第3点（κ)、接触感知后反转值、测定子直径（d）就可自动找到中心位置，同时给出测定物直径（D)。

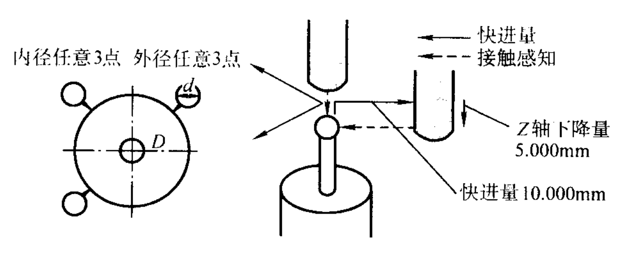


图 2.7-26 任意三点定位

6) 放电位置定位　是指采用微小规准加工过程中，用手动微调 X、Y 轴，使 Z 轴寻找到最深点，见图2.7-27。这种方法主要用于修复型腔模具或无法再进行其他方式的找正。采用模块方法，仅输入移动轴和方向，按执行键，配合手动微调 X、Y 轴，观察 Z 轴下降到最深为止。

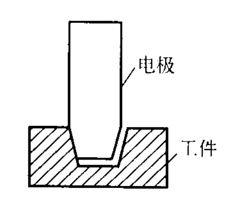


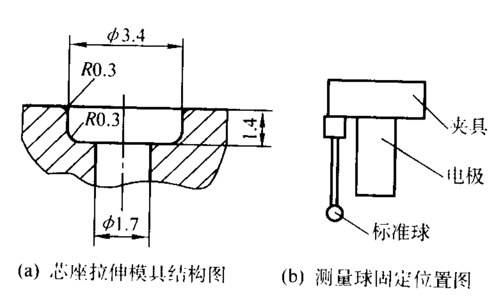
图 2.7-27 放电位置定位

(2) 在机检测技术

将自动定位功能进一步延伸，借助标准球为测量球和相应的计算就可对工件和工具电极进行检测，相当于三坐标测量机。这项技术的最大优点是在加工过程中，不用拆卸被测件，直接在机床上对被测件的尺寸和位置进行在机检测，这是加工精密微细件不可缺少的条件。曾将在机检测结果与三坐标测量机的检测结果进行对比，其精度误差≤2 μm。在机检测技术主要用于：①对已加工的工件各尺寸和相对位置的检测；②工具电极各尺寸和损耗的检测；③对于尺寸精度要求在微米级的精密微细件，特别是拆下无法重复安装的件，在加工过程中时时对加工的型腔尺寸和工具电极进行在机测量，以判断是否符合加工精度要求和计算继续加工的进给量，直到检测合格停止加工。下面介绍几种在机测量技术。

1) 对工件各加工表面上型腔尺寸的测量　这一测量主要是利用数控系统的自动端面定位功能。测量时可使用测针或者是测量球。当测量球在同一方向上自动碰不同深度的型面时，所得到的位置差，即得到型腔的深度尺寸。当测量球在型腔中碰了一个型面后，再向相反的方向碰另一面所得到的位置差，再减去或加上测量球直径，即是型腔的宽度（或型腔的内径）。

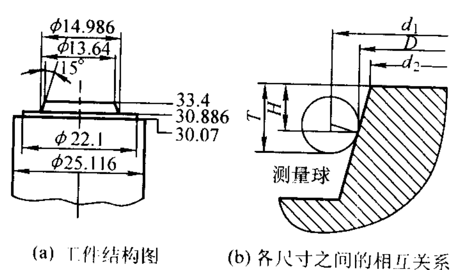
以图 2.7-28 所示型腔的测量为例说明如何测量。该图为 12 步“芯座拉伸模具”。12 个型腔均在电火花成形机上加工，图示型腔为第 12 步的凹模型腔。其中 $\phi 1.7$ mm 孔用线切割切出，此型腔最大的难点在于如何测量每一步型腔的孔是否到达要求尺寸，如用通止规测量，由于 $\phi 3.4$ mm 内腔的上口为圆弧，立面长度很短，无法感觉是否到达尺寸。最后，用 $\phi 1$ 的测量球在机测量，保证了加工精度。测量时，首先将 $\phi 1$ 测量球固定在电极一侧，如图 2.7-28b 所示。然后设定坐标系，加工为第 1 坐标系，测量为第 2 坐标系，并将画面显示在第 2 坐标系下。第三步将 $\phi 1$ 测量球探进型腔，在 X、Y 向分别碰两侧型腔内壁，将测得尺寸差加上测量球的直径，即得到型腔内径尺寸；再用 $\phi 1$ 的测量球碰工件的上表面，记下位置坐标后，用球碰型腔底面，两次所得的位置坐标差即为型腔深度。测量时要注意测量球与工具电极的位置不要干涉。



(a) 芯座拉伸模具结构图　(b) 测量球固定位置图

图 2.7-28　12 步芯座拉伸模具测量示意图

2）锥面尺寸的测量　以图 2.7-29 所示带锥度的一工件的测量为例说明如何测量。该工件尺寸精度要求较高，且不易测量，在数控电火花成形机床上可实现边测量边加工，以保证精度。



(a) 工件结构图　(b) 各尺寸之间的相互关系

图 2.7-29　带锥度工件的测量示意图

这一测量主要是利用数控系统的自动柱中心定位功能和相应的计算来完成。测量的方法如下：使用 $\phi 2$ 的测量球，先碰工件的上表面（33.4 表面）。以此面为基准 0，让测量球移开此表面，向下走一个固定距离 T，在此高度上测量工件的外径，将两边碰完的位置设为 d_1，以下为计算方法：

设测量球的半径为 R，锥度半角为 α。

① 测量球与工件相碰的测量点至基准 0 点的距离为

$$H = T - (R - R\sin\alpha);$$

② 测量点位置实测出的直径尺寸为

$$D = d_1 - 2R\cos\alpha;$$

③ 按图纸要求的尺寸计算出在该测量点上的理论 D' 值

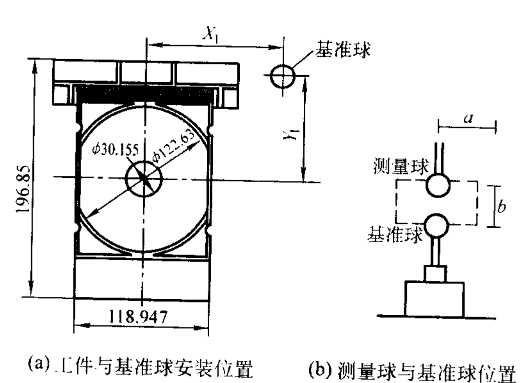
$$D' = d_2 + 2H\tan(90° - \alpha)。$$

比较②与③的数值，即可知加工是否到尺寸了。

实际操作时，要多测量几个点，计算后取平均值以求准确。实践证明，这种在机测量方法，既准确又节省时间。

3）工件基准与基准球之间坐标的测量　在精密复杂型腔模具的加工过程中，使用基准球建立加工坐标系的基准坐标点，对于提高复杂模具多型腔之间的尺寸精度和模具整体精度是必不可少的，而且还为加工中使用多电极的重复定位及多次加工提供了方便定位基准。这种方式一般多用在模块上多方向均有型腔、基准面不易确定或不便使用的情况下。

如图 2.7-30 所示激光唱盘模具的加工：该模块上型腔复杂，除安装面之外，各面上都有需加工的型腔，且相互之间尺寸精度要求高。模块设计基准为中心上的 $\phi 30.155$ mm 圆孔。这一基准不能直接用作电极定位。为了便于电极定位，可在模块之外安装一基准球，以基准球来作为整个加工的定位基准。那么就必须测量出球心与工件基准之间的距离 X_1、Y_1、Z_1，以便加工中电极定位使用。



(a) 工件与基准球安装位置　(b) 测量球与基准球位置

图 2.7-30　激光唱盘模具的加工

测量方法如下。

第一步：建立坐标系，第 1 坐标系为加工坐标系，用 A01 表示；第 2 坐标系为基准球坐标系，用 A02 表示，基准球安装在不妨碍加工的位置，基准球直径为 $\phi 6$。

第二步：电极接柄头上安装测量球，直径为 $\phi 6$。在 A02 坐标系用测量球定基准球的位置。先把测量球移动在基准球上方（见图 2.7-30b），用自动柱中心定位，输入相应参数，执行后确定了基准球球心与测量球的球心位置，其坐标值 $X = 0$、$Y = 0$、$Z = +1.0$，即测量球在基准球正上方 1.0 处。

第三步：切换到 A01 坐标系，用测量球定基准球与工件的位置关系，将主轴上的测量球移动至工件上的基准 $\phi 30.155$ mm 圆孔中，使用自动孔中心定位，输入相应参数，使测量球找到圆孔的中心位置，即坐标值（X_1、Y_1），存储该坐标值再将测量球移到工件的上表面，在该面基准位置处碰端面并返回到 $Z = 1.0$ 的坐标位置（Z_1），并存储。此时被存储的 X_1、Y_1、Z_1 坐标值即为工件基准与基准球之间的距离。

第四步：取下主轴上的测量球，换上所需用的工具电极并进行自身找正。在 A02 坐标系下，将工具电极移到基准球处找正定位。再根据第三步基准球与工件基准之间存储的距离及所要加工的型腔的位置尺寸，将电极移到加工位置完成找正，即可开始加工。

以上分析可见，这种定位测量方法的使用，使得模块上所有型腔的基准一致，大大减少了不必要的定位误差。

在机检测和基准球的使用方法还有许多，在后面的实例中再介绍。

（3）自动定位和在机检测的注意事项

1）在定位前应保持被定位、检测的工件和工具电极表面没有毛刺、凸边和尘物，以免影响定位、检测精度（见图 2.7-31）。

2）用大面积工具电极定位时，直接用工具电极底面与工件上面之间面对面的接触定位精度不好（图 2.7-32a），应在工具电极与工件之间插入基准球，这种方法是面对点的接



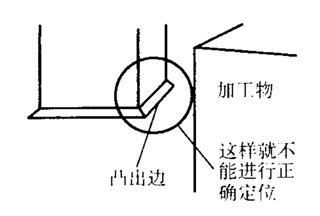
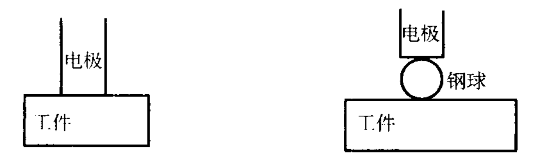


图 2.7-31 毛刺和尘物对定位的影响

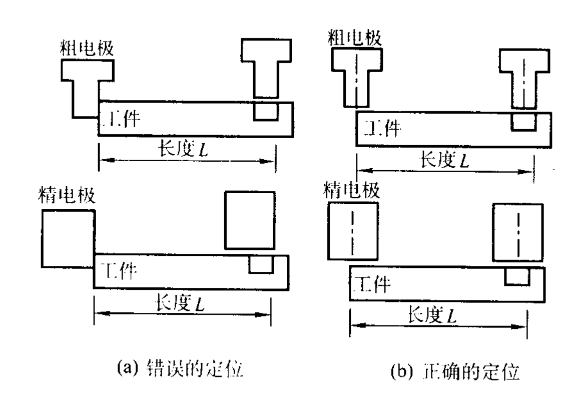
触（图 2.7-32b），用这种方法应在不同部位多测几点，计算测量值的平均值做为定位的位置，定位前要预先测量基准钢球的直径。



(a) 工具电极直接碰在工件上的定位（差） (b) 基准球插入的定位（好）

图 2.7-32 大面积工具电极的定位方法

3）以工件侧面为基准的定位要考虑单边电极收缩量（见图 2.7-33）。由图 2.7-33a 可以看到，先把粗加工工具电极碰在工件侧面上，再把工具电极移动 L 距离，做粗加工；然后把精加工工具电极碰在工件侧面上，再把工具电极移动 L 距离，做精加工的话，会产生粗加工工具电极和精加工工具电极的收缩量的定位误差，显然定位方式是错误的。正确的定位方法如图 2.7-33b 所示，第一测量并记录粗加工、精加工工具电极的尺寸；第二把工具电极碰在工件侧面上，再把工具电极移动到测量尺寸的一半距离，使电极的中心与测量边对齐；第三从中心位置再将工具电极移动 L 距离。用同一方法，对粗、精两个工具电极进行找正。



(a) 错误的定位 (b) 正确的定位

图 2.7-33 工件侧面基准的正确定位

4）当工件过大以致工具电极无法移动到工件的被测面时，可借助块规和圆柱销进行定位，见图 2.7-34。

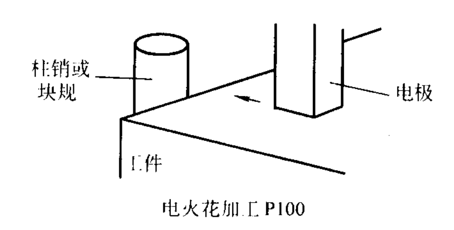


图 2.7-34 过大工件的定位方法

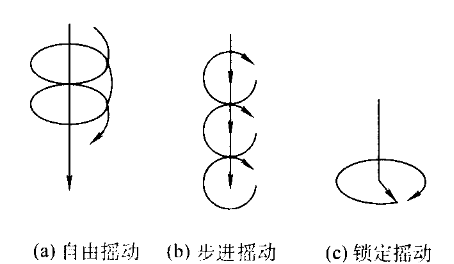
5）在精度要求高的场合，应尽可能采用基准球进行检测、定位。

3.3 NCEDM 的多功能、多方式的摇动技术

摇动（LORAN 或 Orbit，各生产厂采用不同代号，以下以日本沙迪克公司为例）加工功能是 NCEDM 必须具备的功能之一。它是指在主要执行轴进行伺服加工时，在其他两轴上作简单形状的轮廓动作的加工。它可通过在电极和工件之间进行一系列奇特的相对运动、用于排出蚀除产物，保证持续稳定加工的目的，或用于针对加工进行方向，进行侧面加工的目的。这种摇动加工，不仅适用于在 G01（直线插补）作单轴伺服加工，同样适用于在 G02、G03（圆弧插补）作两轴及多轴伺服加工，这是普通 SEDM 不具备的。

3.3.1 摇动加工功能控制的基本参数

摇动加工依据动作有三种类型、以日本 Sodick 公司北京斯巴克公司和汉川机床厂为例：自由摇动（FREE LORAN）、步进摇动（HS LORAN）和锁定摇动（LOCK LORAN）。这三种摇动类型的轨迹示意如图 2.7-35 所示。



(a) 自由摇动 (b) 步进摇动 (c) 锁定摇动

图 2.7-35 三种摇动类型的轨迹

（1）三种摇动类型

1）自由摇动（FREE LORAN） 是用得最多的摇动方式，在加工时按照给定形状的轮廓摇动，伺服轴自由进给。在摇动时，工具与工件的侧面间隙随时变化，间隙小处产生火花放电，促进蚀除产物的排除。这种方式主要用于冲液困难，形状不均匀的盲孔加工。

2）步进摇动（HS LORAN） 是指限制伺服轴只作步进进给，优先在摇动动作平面上作轮廓动作（水平方向的循环运动）的摇动。在各象限作摇动动作时，伺服轴只能在事先确定的范围内步进伺服，一个象限的摇动动作完后，要判断极间状态：若良好，进行伺服范围内动作；若较差，伺服轴将处于待机和后退。这种方式主要用于直壁加工，能较好地保证表面粗糙度和尺寸精度。

3）锁定摇动（LOCK LORAN） 是指伺服轴锁定，停止进给，仅进行摇动动作，同时摇动量逐步扩大，直到指定值为止。在加工时，每一周摇动动作结束都要判断极间的状态，若良好，间隙较大时，扩大摇动量，若较差，在去除侧面加工量前，保持甚至减少目前的摇动量。这种方式的加工可以使电极的整个侧面轮流进行加工，电极损耗均匀，不易产生锥度，较好的保证尺寸精度。

用锁定加工有两点值得注意：

① 锁定摇动是停止伺服轴的特殊加工，轴向移动量必须为零。因此，在编制程序时，必须将伺服轴移动到锁定摇动加工的起始位置。例如，在 $Z=-10.0$ 的位置进行 0.5 mm 圆轨迹的侧面加工，程序编制为：

G54 G90 Z+1.0；（第一坐标系，绝对坐标，Z 轴在 +1.0的位置）

G01 Z-10.0；（直线加工到 $Z=-10.0$ 的位置）

LN201 STEP500；（在 XY 平面，进行 0.5 mm 圆轨迹的锁定加工）（STEP 后的数字为摇动幅度）

G01 Z-10.0；（设定 Z 轴的移动量为零）

M02；（程序结束）

② 当加工开始时，电极底面的间隙和侧面的间隙很小，不能正常加工。

(2) 摇动加工的基本参数

反映摇动加工的基本参数有：摇动类型、摇动平面、摇动方式、摇动速度、摇动象限、摇动量。日本沙迪克公司、北京斯巴克公司和我国汉川机床厂等用 LN＊＊＊、L＊＊、LP＊＊＊＊、STEP＊＊＊＊符号表示（＊＊＊＊表示4位数，其余类推）。

LN：决定摇动动作的类型、伺服方式；动作平面；轨迹形状。

LN＊＊＊（3位数）

LN后右起第1位数（0～5）表示摇动轨迹的类型，0：无摇动；1：圆形；2：方形；3：棱形；4：X形；5：十字形。如下表所示。

0	1	2	3	4	5
无摇动					

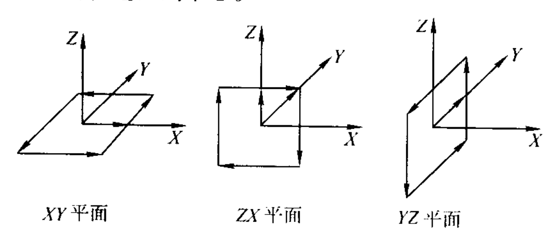
LN后右起第2位数（0～8）表示摇动动作平面及伺服方式

0：*XY*平面、无伺服；3：*XY*平面、伺服1；6：*XY*平面、伺服2

1：*ZX*平面、无伺服；4：*ZX*平面、伺服1；7：*ZX*平面、伺服2

2：*YZ*平面、无伺服；5：*YZ*平面、伺服1；8：*YZ*平面、伺服2

注：伺服1表示电极后退时，返回到轨迹；伺服2表示电极后退时，返回到中心。



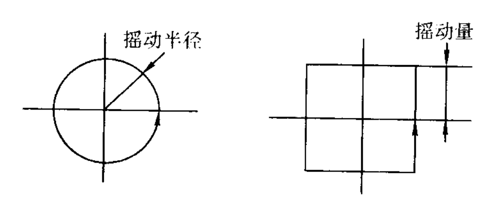
LN后右起第3位数（0～7）表示摇动动作的种类

0：自由摇动；　5：分象限自由摇动

1：步进摇动；　6：分象限步进摇动

2：锁定摇动；　7：分象限锁定摇动

STEP：表示和决定在摇动动作中的摇动量（摇动半径），单位为μm，表示为STEP＊＊＊＊（最多为4位数μm），输入的范围一般为5～9 999μm。



L：决定摇动动作的方向、速度

L＊＊（2位数，第1位表示速度0～9；第2位表示方向0～2）

摇动速度，用0～9数值来决定摇动动作的速度。0为最高速，9为最低速。

摇动动作方向。0：每转2周，正反方向各转一次。

1：固定为逆时针方向摇动。

2：固定为顺时针方向摇动。

LP：如分多个象限摇动时，决定摇动动作的轨迹形状。

LP＊＊＊＊（4位数，自右至左依次为）

第4象限的摇动动作的轨迹形状。
第3象限的摇动动作的轨迹形状。
第2象限的摇动动作的轨迹形状。
第1象限的摇动动作的轨迹形状。
}参见左表中0～5

注：作为摇动动作的轨迹形状，可输入的数为0～5，共六挡，数值0时，这个象限无摇动动作（参见前表中0～5）。

例如程序1为：LN500；

LP1024；

分象限的摇动动作轨迹如图2.7-36所示。分多个象限摇动动作中，前一象限摇动动作的结束点与后一象限摇动动作的起始点不同时，在前一象限动作结束后，后一象限动作开始点之间，自动插入直线运动。

程序2为：LN500；

LP1014；

分多个象限的摇动动作轨迹如图2.7-37所示。

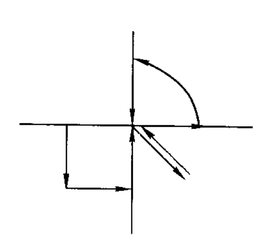


图2.7-36　分多个象限摇动LP1024摇动基本轨迹

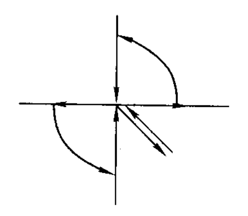


图2.7-37　分多个象限摇动LP1014摇动基本轨迹

3.3.2　摇动类型及合理选用

摇动类型要根据电极的形状、加工形状来选择。最常使用的类型为圆形、方形，约占90%左右。图2.7-21a为五种基本摇动类型。表2.7-6为6种电极的形状所对应的摇动类型。表2.7-7为摇动类型与加工尺寸的关系。

表2.7-6　电极的形状所对应的摇动类型

形状						
对象	圆或圆弧连续形状	正方形、矩形	有 *R* 角的形状	圆弧＋直线	多边形	底面三维形状



续表 2.7-6

适用类型	⊖	□	⊖	□	⊖	⊖	⊖
备注			R角已减去摇动量的尺寸	R角只减去最终精加工条件的放电间隙的尺寸		边缘部产生圆弧R，理想情况是采用多边形类型	使用粗、精加工电极，精加工电极的尺寸应在底面形状精度范围内取小值

表 2.7-7　摇动类型与加工尺寸的关系

序号	电极形状	摇动类型	加工形状	加工尺寸
1	d	L.S	D	$D = d + 2$（STEP + O.V.C） L.S = STEP—摇动半径（摇动量） O.V.C—单边放电间隙
2	d	L.S	A D A A A	$D = d + 2$（STEP + O.V.C） $A = 2 \times$ STEP
3	d	L.S	R D	$D = d + 2$（STEP + O.V.C） R = STEP + O.V.C
4	d	L.S	R D	$D = d + 2$（STEP + O.V.C） R = O.V.C
5		L.S	R B A	$A = B$ = STEP + O.V.C R = STEP + O.V.C
6		L.S	C B θ A	$A = C =$（STEP + O.V.C）> B $\theta = 45°$ $B = \cos\theta \times A = 0.717 \times A$ R = L.S + O.V.C
7	RE d	L.S	R r D	$D = d + 2$（STEP + O.V.C） R = RE + STEP + O.V.C r = STEP + O.V.C

续表 2.7-7

序号	电极形状	摇动类型	加工形状	加工尺寸
8	RE d	L.S	R D A 直线部	$D=d+2$（STEP + O.V.C） $R=$ RE + O.V.C $A=2\times$ STEP
9	RE	L.S	D R A(平面)	$D=2$（RE + STEP + O.V.C） $R=$ RE + O.V.C $A=2\times$ STEP
10	RE d	L.S	R D	$D=d+2$（STEP + O.V.C） $R=$ RE + STEP + O.V.C
11	RE d	L.S	R D	$D=d+2$（STEP + O.V.C） $R=$ RE + STEP + O.V.C

注：L.S = STEP——摇动量；O.V.C——单边放电间隙。

在进行摇动加工时，如摇动类型选择不合理，会严重影响型腔的形状精度和尺寸精度。下面用一正方形电极分别按上面介绍的摇动类型（见图 2.7-21a）进行加工，则摇动后的型腔形状如图 2.7-38 所示。由图可见，摇动类型的不同，加工的型腔形状有很大的差异。

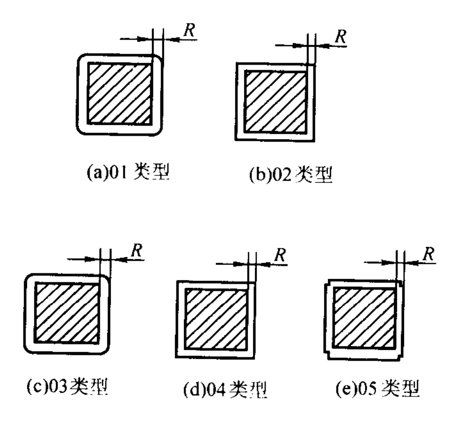


图 2.7-38　不同的摇动效果

下面以微电机的“三叉冲头”工件为例分析采用不同摇动类型产生的误差（见图 2.7-39）。由工件图可见，该工件尺寸精度要求很高，需同时保证三个叉的宽度尺寸和圆的直径尺寸。那么该冲头加工时可选用的摇动轨迹只能是 01 和 03 类型，而不能选用 02、04、05 类型，可以选用 01 方式加工，以保证三个叉的宽度尺寸一致。如用 02、04、05 轨迹加工，不仅不能保证圆的形状精度，还会造成三个叉的宽度尺寸不一致，分析如下。

1）如选用方式 05 摇动加工，则图中上面的一个叉在宽度方向上的去除量为：$2\times$ STEP，而下面二个叉在宽度方向上的去除量为：$2\times \text{STEP}\times\cos30° = 2\times0.866\text{STEP} = 1.732\text{STEP}$，加工后的三个叉宽度尺寸之差为：$2\times\text{STEP}-1.732\text{STEP}=0.268\text{STEP}$。

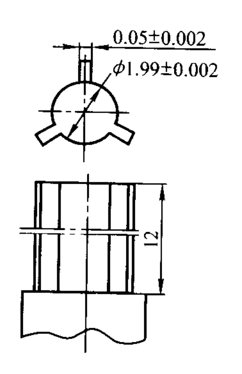


图 2.7-39　三叉冲头结构图

2）如选用方式 04 摇动加工，则上面的一个叉在宽度方向上的去除量为：$2\times$ STEP，而下面二个叉在宽度方向上的去除量为：$2\times\sqrt{2}\text{STEP}\times\cos15° = 2\times1.366\text{STE} = 2.732\text{STEP}$，加工后三个叉宽度尺寸之差为：$2.732\text{STEP}-2\times\text{STEP}=0.732\text{STEP}$。

由上可见，摇动量STEP越大则三个叉的宽度尺寸差越



大。从图 2.7-39 工件的公差要求可知，不能选用这样的摇动方式。

3.3.3 摇动加工的作用

1）用一个电极进行从粗加工到精加工的所有加工（见图 2.7-40 不通孔加工的自由摇动加工过程），可降低电极成本，减少电极交换等所需的工时。

2）摇动动作可促进放电蚀除产物的排除，从而缩短加工时间。加工深度越深，加工效果越明显，图 2.7-41 给出了有无摇动动作与加工时间和加工深度的关系曲线。

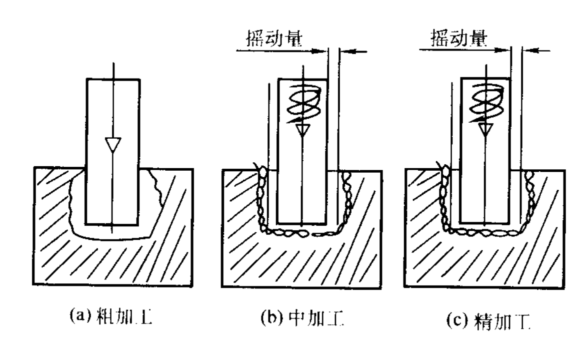


图 2.7-40　不通孔加工的自由摇动加工过程

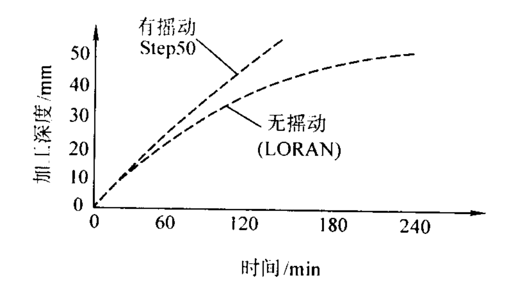


图 2.7-41　有无摇动动作与加工时间和加工深度的关系

3）提高加工尺寸精度。通过改变摇动方式，可去除加工斜度、中间膨胀、表面起伏等缺陷；另外，由于电极表面的凹凸不平不会直接被复制，所以表面精度和表面粗糙度得以改善。图 2.7-42 给出了采用自由摇动加工中电极表面较大的凹凸可加工出较光的加工面就像毛糙的锉刀可加工出较光的表面一样。

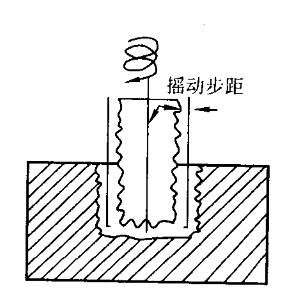


图 2.7-42　加工中电极表面的凹凸与加工面改善的关系

4）最小摇动量可设定到 1 μm，所以可对加工尺寸进行微细调整，使高精度加工简单易行。

5）电极制作变得容易。由于摇动功能具有调整加工尺寸的作用，所以电极的绝对尺寸精度无需确保，只要保证相对尺寸精度就可以。

6）利用 Z 轴锁定摇动加工法，可进行内螺纹、凹槽、曲面的加工。图 2.7-43 为内凹槽及螺纹加工的示例。

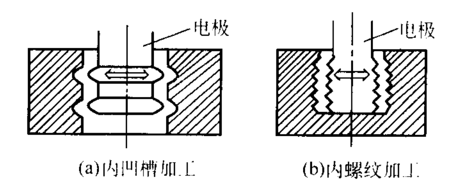


图 2.7-43　Z 轴锁定摇动加工方法的应用

7）作为摇动功能的进一步扩展，数控系统可以使得摇动量随着加工深度的变化而改变，这就是锥度摇动。锥度摇动有多种用途，且使用方便。以加工型腔模具的出模斜度为例，一般是在制造成形电极时将电极做成斜的，这样给电极的制作造成了一定的困难。要求较高时可用锥度线切割机切出斜度。要求不高时，由钳工手工修锉出此斜度，如使用数控电火花机床的锥度摇动功能，则电极就可做成直的，使用锥度摇动功能既可提高加工精度，又减少了工序。以加工激光唱盘芯模块上的 DISC 符号形状为例（见图 2.7-44）：这在模块上是一个长方形锥度凸起。形状虽不很复杂，但加工锥度斜面的电极难度较大，如使用锥度摇动功能，则电极只需做成直壁的即可。电极的尺寸设计为：电极的尺寸 = 工件形状大端的尺寸 + 2 × 放电间隙量。

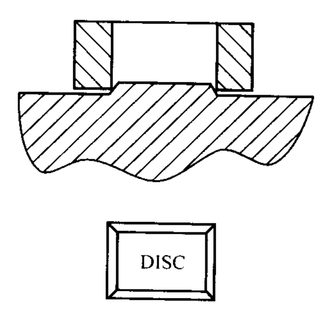


图 2.7-44　激光唱盘芯模

3.4 NCEDM 编程使用的基本指令介绍

能够利用指令编制程序进行加工也是 NCEDM 必须具备的功能之一，通过运行编好的程序，实现从定位、找正、参数设定到加工的连续作业，确保用同一个程序加工一批工件的一致性，减少人为因素造成的误差。常用 NCEDM 指令和功能见表 2.7-8。每条指令的具体使用方法在示例中分别介绍。

精密数控电火花成形加工机床（如北京迪蒙斯巴克工控技术有限公司生产的型号为 CNC – B35）采用国际通用 ISO 代码进行编程，其中，G 表示准备功能；M 表示辅助功能；C 表示加工条件，X、Y、Z 表示三轴移动的尺寸和方向；T 表示机械控制功能等。

3.5 NCEDM 的多种加工方式

NCEDM 的加工方式有单轴直线（Z 轴、XY 轴水平）加工、两轴联动平面加工、三轴联动三维空间加工、任意轴与 C 轴联动加工、反拷贝加工、轨迹加工等。

下面就在北京迪蒙斯巴克工控技术有限公司 CNC – B35 精密数控电火花成形加工机床上如何实现各种加工方式及程序的编制加以介绍。

（1）单轴直线加工

1）Z 轴加工　通常使用最多，普通电火花加工机床只有此加工功能。

表 2.7-8 常用的 NCEDM 指令和功能

指令		功能
G 指令	G00	定位移动
	G01	直线插补
	G02	圆弧插补（顺时针）
	G03	圆弧插补（逆时针）
	G04	间歇
	G05	X 镜象
	G06	Y 镜象
	G07	Z 镜象
	G08	X－Y 镜象
	G09	取消镜象和 X－Y 变换
	G15	用于 C 轴回到原点
	G17	指定 XY 平面
	G18	指定 ZX 平面
	G19	指定 YZ 平面
	G24	仅限于 Z 轴的 AJC 动作指令
	G25	通常的 AJC 动作指令
	G54	工件坐标系 0
	G55	工件坐标系 1
	G56	工件坐标系 2
	G57	工件坐标系 3
	G58	工件坐标系 4
	G59	工件坐标系 5
	G80	移动到可执行接触感知处
	G81	移动到机械的限位
	G82	移动到原点与现在位置的一半处
	G83	读取现在值的指令
	G85	时间加工指令
	G90	绝对坐标指令
G 指令	G91	增量坐标指令
	G92	设定坐标原点的指令
	G93	X 镜象
	G94	Y 镜象
	G95	X－Y 镜象
	G96	取消镜象
T 指令	T01～T24	使用 ATC 电极交换时使用的指令
	T84	泵开 ON
	T85	泵停 OFF
M 指令	M00	程序暂停
	M02	有选择的程序暂停
	M04	加工结束后，复归加工开始点的指令
	M05	无视（取消）接触感知
	M06	不放电
	M07	C 轴锁定
	M98	调用子程序
	M99	子程序结束
其他指令	N＊＊＊＊	子程序开始和序列号
	P＊＊＊＊	子程序的序列号
	L＊＊＊＊	子程序的循环次数
	H000～H099	各文件中自定义的取消/设置和补偿值
	H100～H999	取消/设置文件中定义的公用的取消/设置和补偿值
	C000～C099	各文件中自定义的加工条件
	C100～C999	文件中定义的公用加工条件
	I、J、K	指定圆弧中心坐标
	X、Y、Z、U、V	显示各轴移动数值，U、V 轴旋转角度值，此处的 U 轴指 C 轴

如图 2.7-45 所示，在工件上加工出深 10 mm 的型孔，其程序为：

G92X0Y0Z0U0；（为 *XYZ* 零点设定）

G90G00X0Y0Z1.0；（在绝对坐标系下，移动到加工开始位置）

T84；（开工作液泵）

C150 STEP10 LN002；（选择加工条件）

G01Z－10.0 M04；（Z 轴向下直线加工 10 mm，加工后返回到开始点）

G83T003；（在 H003 处记录加工时间）

T85：（关工作液泵）

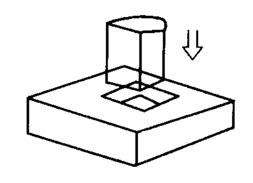


图 2.7-45 Z 轴向下伺服加工

M02；（加工程序结束）

说明：G01 为直线插补加工，C150 为加工条件代码，STEP10 为摇动量 10 μm，LN002 为 *XY* 平面内的方形（□）轨迹的自由摇动，*Z*－10.0 为向 *Z* 轴负方向加工 10 mm，M04 为加工结束后返回到起始点。

2）*X* 轴水平加工　*X* 轴水平方向伺服加工。

如图 2.7-46 所示，横向加工出一个深 5 mm 的小槽坑，其程序为：

G92X0Y0Z0U0；（为 *XYZ* 零点设定）

G90G00X＋1.0Y0Z－20.0；（在绝对坐标系下，移动到加工开始位置）

T84；（开工作液泵）

C150 STEP10 LN022；（选择加工条件）

G01X－5.0 M04；（*X* 轴向－方向直线加工 5 mm，加工后返回到开始点）

G83T003；（在 H003 处记录加工时间）

T85；（关工作液泵）

M02；（加工程序结束）

说明：LN022 为 *YZ* 平面内的方形（□）轨迹的自由摇

边摇动修光侧壁的动作，电极的摇动轨迹如图2.7-53所示，以上二种功能为轨迹加工提供了良好的加工环境。

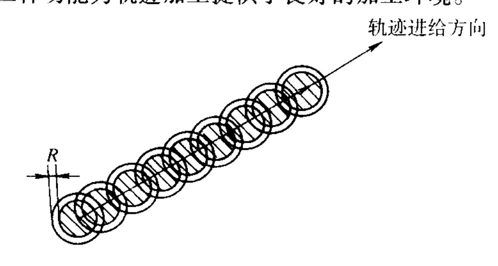


图2.7-53　电极的摇动轨迹

值得注意的是：轨迹方式的加工方法虽然使加工的范围扩大，但使用也是有一定局限性的。它的不足之处在于：由于电极的简化使得加工时放电的有效面积大大缩小，由于面积效应的影响使得加工时电极进给方向上电极耗损加大。当轨迹进给的路程较长时，损耗就会影响加工的精度，加工面积的减少还使加工速度降低。因此在选用轨迹加工时应综合考虑加工速度、损耗对精度的影响以及电极制作等各方面的问题。选用的基本原则如下。

① 在成形电极制作不很困难时，能用成形电极加工就不要用轨迹加工方式。

② 在成形电极整体制作困难时，可先考虑分解电极加工方式，即将复杂电极分解成几个部分分别加工。

③ 在必须使用轨迹加工方式时，尽可能选择加工面积较大的进给方式，路线越短越好。

使用轨迹加工时最好用多电极加工法或加工过程中反拷贝电极来弥补电极损耗的不足，保证加工精度。

(6) 反拷贝加工

这是将被加工件安装在主轴头（Z轴）上，而工具电极安装在工作台上进行加工的方法。经常用于工具电极修正加工，工具电极修正加工是轨迹加工、精密微细小孔加工等用的。

图2.7-54为反拷贝加工示意图，固定在工作台上用于修整工具电极的称一次电极，由一次电极成形的实际使用的工具电极称二次电极。一次电极使用的材料多为银钨合金、铜钨合金、纯铜等；二次电极使用的材料多为纯铜，精密加工或要求损耗小的加工使用铜钨合金。

图2.7-54a为侧面反拷贝修正，将二次电极安装在主轴头上的R旋转轴内，一边旋转，一边在一次电极侧面进行修正成形加工。

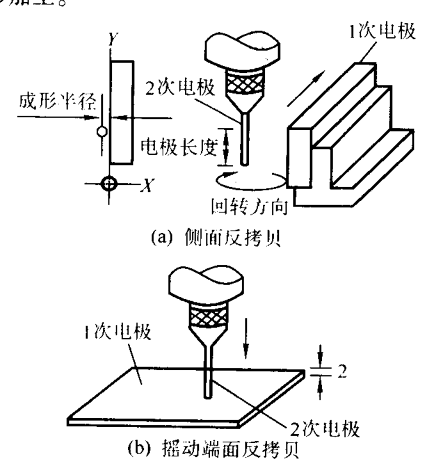


图2.7-54　工具电极反拷贝加工示意图

图2.7-54b为摇动端面反拷贝修正，一次电极用2~3 mm薄板，在上面是要修正反拷贝的电极，二次电极从上向下进行修正端平。

工具电极反拷加工注意事项如下。

① 为防止二次电极旋转成形时振动较大，电极露出夹具端面的长度应尽可能短，电极成形的长度大约为电极直径的40~50倍，若大于此值，则端部的精度降低。

② 在开始加工时，由于工具电极与回转轴的不同轴及尺寸偏差，伺服速度应慢，为S7~9，伺服基准电压为25~35 V。当加工稳定（电压表的指针摆动很小）时，伺服速度应调快为S3~4，伺服基准电压改为80~100 V。如始终在不稳定的状态进行加工，工具电极将变成椭圆状、扁平状，导致加工时间变长或无法成形到规定的尺寸。

(7) 同时修光侧面和底面的摇动加工

如图2.7-55所示，修光孔ϕ12 mm×10 mm的侧壁和孔底，

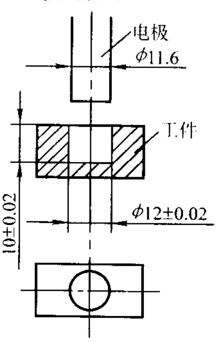


图2.7-55　摇动修圆孔

表面粗糙度 $R_a=4\ \mu m$，单边摇动量为200 μm，其程序为：

G92X0Y0Z0U0；（为 *XYZU* 零点设定）

G90G00X0Y0Z1.0；（在绝对坐标系下，移动到加工开始位置）

T84；（开工作液泵）

C150；（选择加工条件）

G01Z-9.75 M04；（Z轴向下直线加工9.75 mm，加工后返回到开始点）

G83T003；（在H003处记录粗加工时间）

C120 LN001 STEP140；（选择加工条件，在 *XY* 平面圆摇动，摇动量140）

G01Z-9.95 M04；（Z轴向下直线加工9.95 mm，加工后返回到开始点）

G83T005；（在H005处记录精加工时间）

T85；（关工作液泵）

M02；（加工程序结束）

3.6　加工规准的选择、转换，摇动（平动）量的分配和电极尺寸的设计

在加工任何塑料型腔模时，无论使用普通SEDM，还是数控NCEDM，都要满足图样的尺寸精度、表面粗糙度的要求，同时还要有较高的加工速度。所以选择加工规准、设计电极尺寸的缩放量以及规准和摇动量的转换是非常重要的，三者是密不可分，必须同时考虑。过去，人们都是凭经验进行选择，不利于电火花加工技术正确的使用。现在，各厂家都为用户提供了加工参数表和对应的加工结果，并作成数据存储在机器中，这就为应用公式计算提供了依据。

(1) 选择加工条件前应考虑的因素

1) 注意加工速度、表面粗糙度、电极损耗比、加工余量这四种加工特性。

2) 注意放电加工表面粗糙度 R_{max} 指示值与目测的差异。

3) 注意电极损耗比与损耗值的差异，加工条件表中为端面损耗值）。



4）当表面粗糙度值提高一倍时，加工速度会下降到原来的1/5以下，因此必须选择适当的加工规准。

5）最终精加工规准的选择，要符合图纸要求的精加工表面粗糙度（改善外观）。

(2) 粗加工规准的选择和工具电极单边间隙

间隙与峰值电流、脉冲宽度、脉冲间隔等因素有关，主要取决于峰值电流大小。而峰值电流的选取又取决于放电加工面积的大小。在粗加工时，要求高生产率和低电极损耗，这时应优先考虑采用较宽的脉冲宽度（例如在400 μs以上），然后选择合适的脉冲峰值电流。还应注意加工面积和加工电流之间的配合关系。其考虑的因素如下。

1）根据加工面积效应和电极对选择适宜的加工规准。纯铜电极加工钢时，电流密度≤10 A/cm²（最佳），最大为15 A/cm²；石墨电极加工钢时，电流密度≤3～5 A/cm²。在大于上述值的条件下，容易发生电弧现象（电极表面出现皱纹）。

2）工具电极单边间隙≥O.V.C + R_{max}，原则上工具电极单边间隙取值比O.V.C + R_{max}值大，其中，O.V.C为加工间隙，R_{max}为表面粗糙度。工具电极单边间隙即加工后工件尺寸与电极尺寸之差。图2.7-56给出了加工中放电间隙的示意图，其中α为出口间隙，β为入口间隙，γ为最大间隙。这里O.V.C加工间隙指粗加工规准对应的γ值。一般厂家提供的数据库中都给出三个间隙值，若只给出一个间隙值，就按此间隙值进行计算。

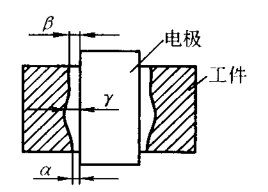


图2.7-56 放电间隙示意图

3）在1）与2）的条件中选择峰值电流（IP值）较小的条件为粗加工规准。

实际上，由于放电加工过程受许多因素的控制，加工面积与峰值电流之间没有精确的数值比例关系，在选择时要考虑加工稳定性好，加工速度快，电极损耗小等效果。

在实际生产中，加工面积的大小是不确定的，因此间隙值各不相同。为了便于设计人员、工艺人员及操作人员，可以将间隙值分成两个系列标准值，单位为mm。

第一系列：0.1、0.2、0.3、0.4、0.5；

第二系列：0.05、0.15、0.25、0.35、0.45。

以上均为单面间隙，适用于中小面积加工，加工时根据加工面积选取。如所选间隙过小，将被迫使用较小的峰值电流，加工速度低，电极损耗大；间隙过大，将被迫使用较大的峰值电流，则易拉弧，加工稳定性差。若采用摇动方式，摇动量过大，会影响加工件的精度。由于在进行成形加工工艺之前，电极已经加工好了，没有修改的可能，因此，在工艺准备阶段，工艺人员要认真考虑加工方案。确定间隙值后，再设计和加工电极。

(3) 从粗加工规准到精加工规准的选择

中规准与粗规准之间并没有明显的界限，应按具体加工对象划分。

1）选择主要考虑两方面的因素 ①以后一挡表面粗糙度达到前一挡表面粗糙度的1/2为条件；②以最终精加工的表面粗糙度为条件。

例：$R_{max}=50\ \mu m \rightarrow R_{max}=25\ \mu m \rightarrow R_{max}=12\ \mu m \rightarrow R_{max}=6\ \mu m$

2）在IP3以下的条件时，加工速度非常缓慢，应逐渐减少规准，有时选择对加工速度比对损耗更有利的条件。选择的方法：IP3（18 μm）→IP2（12 μm）→IP1（6 μm）。

(4) 加工进给量和摇动（平动）量的计算

间隙确定了，开始放电进行粗加工的加工规准也知道了，根据最终加工要求，按峰值电流逐级减半或表面粗糙度逐级减半的原则，将整个加工过程分为粗、中、精三个阶段，若干步骤来完成。由于整个过程中，峰值电流逐渐减小，每一步的放电间隙越来越小，要斯侧面和底面同步加工，就要靠加工深度的进给量和摇动（平动）量来补偿间隙，下面介绍计算的方法。

图2.7-57给出了相邻两个规准加工间隙与进给量的关系图。其中A为进给量的使用值，a为进给量的计算值，O.V.C_1为下一规准加工间隙，O.V.C_2为上一规准加工间隙，R_{max1}为下一规准加工表面粗糙度，R_{max2}为上一规准加工表面粗糙度。由图可知加工进给量的公式为

$$A = \text{O.V.C}_2 + R_{max2} - \text{O.V.C}_1 + R_{max1} \tag{2.7-1}$$

其中，O.V.$C_2=\beta$（第一挡加工规准）

$=$O.V.C_1（以后各挡为上一挡加工规准的O.V.C_1）

$R_{max2}=R_{max}$（上一挡加工规准的表面糙粗度）

O.V.C_1 = $(\alpha+\beta)/2$（α、β均为下一挡加工规准的加工间隙）

$R_{max1}=R_{max}$（下一挡的表面糙粗度）

式中，α、β、γ、R_{max}可在加工条件表的数据中查出。

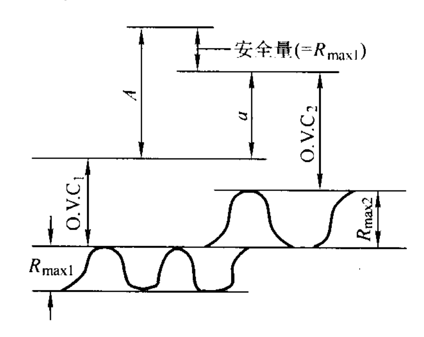


图2.7-57 相邻两个规准加工间隙与进给量的关系

若由多个规准进行加工，其相邻两规准的进给量和这一规准距精加工底面的基准值的关系见图2.7-58，图中C为加工规准，A为进给量，Z为距精加工底面的基准值，1、2、3、4为第几加工规准。计算方法为：

C_1与C_2加工规准的进给量 A_1，C_1加工规准距精加工底面的基准值：$Z_1=A_1+A_2+A_3+A_4$。

C_2与C_3加工规准的进给量 A_2，C_2加工规准距精加工底面的基准值：$Z_2=A_2+A_3+A_4$。

C_3与C_4加工规准的进给量 A_3，C_3加工规准距精加工底面的基准值：$Z_3=A_3+A_4$。

C_4加工规准的进给量 A_4，C_4加工规准距精加工底面的基准值：$Z_4=A_4$。

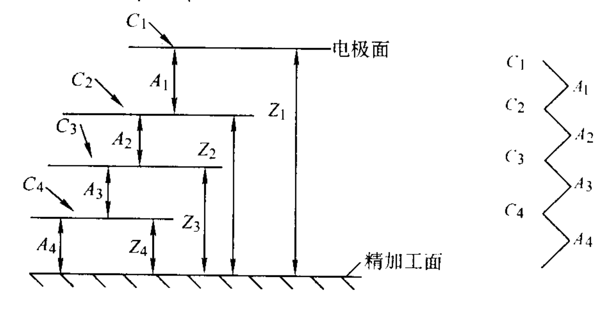


图2.7-58 相邻两规准的进给量和距精加工底面的基准值的关系

在同一条件下加工时，一般侧面的表面粗糙度要比底面略好。就侧面而言，进给量要比底面进给量小 20%～30%。因此，侧面进给量与底面进给量的关系式为

$$B = A \times (0.8 \sim 0.7) \qquad (2.7\text{-}2)$$

式中，A 为底面进给量；B 为侧面进给量。

图 2.7-59 给出了侧面进给量、精加工基准面与摇动（平动）量的关系图。图中 C 为加工条件，B 为侧面进给量，S 为距精加工侧面的基准值，CLE 为电极单面间隙，STEP 为摇动（平动）量。由图可知每一规准的摇动（平动）量计算公式为

$$\text{STEP} = \text{CLE} - S \qquad (2.7\text{-}3)$$

计算方法为：

C_1 加工规准：$S_1 = B_1 + B_2 + B_3 + B_4$，STEP1 = CLE − S_1；

C_2 加工规准：$S_2 = B_2 + B_3 + B_4$，STEP2 = CLE − S_2；

C_3 加工规准：$S_3 = B_3 + B_4$，STEP3 = CLE − S_3；

C_4 加工规准：$S_4 = B_4$，STEP4 = CLE − S_4。

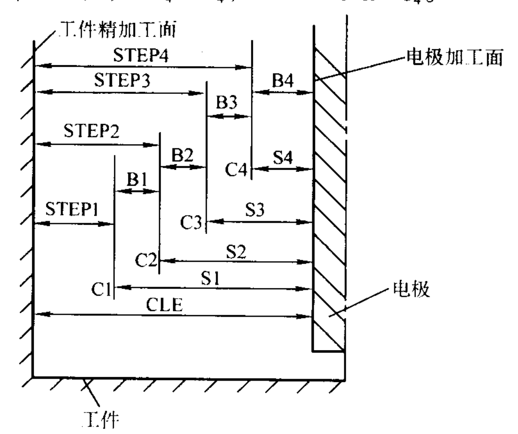


图 2.7-59　侧面进给量、精加工基准面与摇动（平动）量的关系

上面所说的摇动（平动）量是完全按间隙情况选取的，加工终了时最大摇动（平动）量取决于加工开始时最大间隙，但现在机床设计的最大摇动（平动）量允许值都较大，最大摇动（平动）量可达 10 mm。这就为用小电极加工大形状提供了条件。有时因为需要，出现了摇动（平动）量值大于式（2.7-3）的计算值，也就是说，在正常选定的每一挡加工摇动（平动）量基础上，加上了一个扩大量，在第一挡粗加工就要加上这个扩大量。

在一般情况下，不应该采取这种“小马拉大车”加工方式。因为采取这种方式会出现下面几种结果。

1）加工速度降低，摇动（平动）时，单方向加工增加了放电休止时间，另外，人为地将一次能完成的加工蚀除量分为几次来完成。

2）增大损耗，由于摇动（平动）方式是单方向轮流放电，靠电极底部边缘部分工作，而电火花加工过程中，电极的损耗主要在边角（特别是棱角、尖角部分），这样更加大了电极损耗。

3）形状精度降低，由于各种摇动（平动）方式都是由一定的动作逐步逼近的，对于某些摇动（平动）方式，摇动（平动）量太大时，会出现失真的情况。另外，由于边角部分损耗加大，形状误差也随之增大。

间隙和摇动（平动）量的选择在电火花成型加工中是个非常重要的问题，它几乎与所有主要电参数相联系，也直接与加工效果相关。因此，实际工作中，工艺人员应该认真考虑工艺方案，才能较好地发挥机床的功能。

（5）加工参数表和参数说明

现在较先进的机床如日本 Sodick、瑞士 AGIE、北京迪蒙斯巴克等公司产品，都随机带有加工参数表，将加工电参数优化组合。这种组合都是经过大量工艺实验验证的，实验得出的间隙值及表面粗糙度值是可靠的，可根据上面的公式，利用给出的数据进行计算。对于一些安装国产机械平动头的机床，可参考数控机床的做法，将常用电参数组合，再做一些工艺实验，测出间隙值和表面粗糙度值，便可以使用上面的公式。

加工参数表中根据不同电极材料、工件材料和不同的电极损耗要求给出了石墨加工钢（Gr − St）、铜加工钢（Cu − St）、铜钨合金加工硬质合金（CuW − WC）、铜钨合金加工纯铜（CuW − Cu）等加工条件组。下面就以最常用的铜加工钢低损耗条件组为例举一部分加以说明（见表 2.7-9）。

表 2.7-9　铜加工钢低损耗规准

编号	加工规准参数									加工状态		加工性能					
	ON	OFF	MA	IP	SV	PL	V	C	S	平均加工电压 /V	平均加工电流 /A	加工速度 /g·min⁻¹ (/mm³·min⁻¹)	表面粗糙度 R_{max}/μm	电极损耗比 $E/W \times 100\%$	加工间隙 O.V.C α	β	γ
Cu − St（无损耗加工 A）																	
C100	011	011	01	0010	03	+	01	00	02	40	1	0.004 (0.5)	6	1	10	30	50
C110	012	012	01	0020	03	+	01	00	02	60	2	0.020 (2.6)	12	0.8	15	60	80
C120	014	014	01	0030	04	+	01	00	02	65	4	0.045 (5.6)	17	0.7	30	70	90
C150	017	017	01	0060	05	+	01	00	02	75	8	0.220 (28)	36	0.1	80	120	160
C160	018	018	01	0070	05	+	01	00	02	75	10	0.260 (33)	40	0.1	90	160	200



续表 2.7-9

编号	加工规准参数									加工状态		加工性能					
	ON	OFF	MA	IP	SV	PL	V	C	S	平均加工电压/V	平均加工电流/A	加工速度/g·min⁻¹(/mm³·min⁻¹)	表面粗糙度 R_{max}/μm	电极损耗比 $E/W\times100\%$	加工间隙 O.V.C α	β	γ
Cu－St（低损耗加工 B）																	
C200	011	011	01	0010	05	+	01	00	02	40	1.5	0.006 (0.75)	8	5	20	50	70
C210	012	012	01	0020	05	+	01	00	02	60	3	0.025 (3.2)	13	1.7	30	70	90
C220	013	013	01	0030	05	+	01	00	02	65	4	0.060 (8)	17	1.0	35	80	100
C250	016	016	01	0060	05	+	01	00	02	90	8	0.230 (30)	35	0.5	60	120	140
C270	018	018	01	0100	05	+	01	00	02	100	11	0.560 (72)	45	0.8	90	190	220
Cu－St（低损耗加工）																	
C310	005	032	00	0010	05	+	01	00	02	65	1	0.007 (0.9)	7	4	20	40	60
C320	008	008	00	0020	05	+	01	00	02	60	2	0.022 (2.8)	11	2	30	50	80
C330	009	009	01	0030	05	+	01	00	02	70	2	0.046 (5.9)	15	2	35	55	85
C360	012	012	01	0070	05	+	01	00	02	85	7.5	0.280 (36)	35	2	60	100	120

表 2.7-9 说明如下。

1）ON 和 OFF 为脉冲宽度挡位调节和脉冲间隔挡位调节。其中，ON 为设定 1 个脉冲的放电时间，OFF 为设定 1 个脉冲的休止时间，表中为代号。

2）MA 为脉冲间隔 OFF 的脉冲幅度的倍率。例如，OFF 为 10 μs，MA 为 0 挡，则 OFF = 10 × 1 = 10 μs，MA 为 2 挡，则 OFF = 10 × 3 = 30 μs。

3）IP 为设定 1 个脉冲的放电电流的峰值。与脉冲宽度 ON 组合，是决定加工速度、表面粗糙度、电极损耗以及放电加工性能的重要参数。

4）SV 为设定伺服基准电压。SV 设定范围 0～9 共 10 挡，为 0～130 V。

5）PL 为选择电极、工件的放电极性，以主轴为基准，“+”号为正极性，“－”号为负极性。

6）V 为提供 IP 电流的直流电压。V = 01，用于 Cu－St 加工；V = 02，用于 Gr－St 加工。

7）C 为设定极间电容器的容量。C 设定范围 0～9 共 10 挡，从小到大进行调节。

8）S 为设定伺服速度。S 设定范围 0～9 共 10 挡，从快到慢进行调节。通常情况下设定在 2 或 3，但在进行细孔加工、电极反拷贝成形加工、横向加工时，为了不在伺服轴上产生振动，应设定在 6～9，保证稳定加工。

还有两个参数 UP 和 DN 需加以说明。UP 表示抬刀高度分 9 挡可调，DN 表示抬刀周期分 9 挡可调。可根据加工稳定性进行适当的调节。

（6）计算示例

已知条件：单工具电极摇动加工，电极收缩量为0.20 mm/单边，电极截面为边长 9.60 mm 的正方形，工件加工尺寸：长 10.00 mm × 宽 10.00 mm × 深 5.00 mm（± 0.02）mm，表面粗糙度 R_{max} = 6 μm，电极－工件为 Cu－St。

1）首先根据要求的表面粗糙度 R_{max} = 6 μm选择精加工规准。由于不同的加工规准加工后虽然表面粗糙度一样，但加工速度及电极损耗比不完全一样。由表 2.7-9 可以查到有四种加工规准的表面粗糙度满足要求，表 2.7-10 是四种加工规准的对比。

表 2.7-10　四种加工规准的对比

加工规准	表面粗糙度 R_{max}/μm	加工速度 /mm³·min⁻¹	电极损耗比	峰值电流 IP	脉冲宽度 ON（代号）
C100	6	0.50	1%	1	11→加工速度慢
C200	8	0.75	5%	1	11→表面粗糙度大
△C300	6～7	0.90	4%	1	05→ON 短因此外观好
△C310	6～7	0.70	3%	1	08

通过以上对比，精加工规准选用 C310→C300 比较合适，C300 为最终加工条件，加工后外观质量好。

2）根据给出的电极收缩量 200 μm 选择粗加工规准。由表 2.7-9 可以查到满足电极收缩量 200 μm ≥ O.V.C（γ）+ R_{max}的最大条件有三种规准可选择，见表 2.7-11。

由于粗加工蚀除量多，因此在重视电极损耗比的情况下，应验算是否满足面积效应（电流密度 $J\leqslant 10\ \mathrm{A/cm^2}$）的要求：

加工面积：$S = 0.96\times0.96\ \mathrm{cm^2} = 0.92\ \mathrm{cm^2}$



表 2.7-11　三种加工规准的对比

加工规准	O.V.C (γ)	表面粗糙度 R_{max} /μm	加工速度 /$mm^3 \cdot min^{-1}$	电极损耗比 /%	加工电流/A
△C150	160	36	28	0.1	8
C250	140	35	30	0.5	8
C360	120	35	36	2.0	7.5

能流过加工电流：$I = J \times S = 10\ A/cm^2 \times 0.92\ cm^2 = 9.2\ A$

表 2.7-11 中三种加工规准都基本满足加工电流的要求，综合考虑应选用 C150 加工规准。

3）粗加工规准到精加工规准的选择。粗加工选择 C150，精加工选择 C310、C300，那么中加工规准如何选择呢？按照前面介绍的加工电流和表面粗糙度减半的原则，应选择 IP3（R_{max} = 18 μm）和 IP2（R_{max} = 12 μm）作为中加工规准，如表 2.7-12 所示。

表 2.7-12　加工规准

加工规准	粗加工	中加工		精加工	
	C150	* * * *	* * * *	C310	C300
IP	IP6	IP3	IP2	IP1	IP1
R_{max}	36 μm	18 μm	12 μm	6 μm	6 μm

下面对 IP3、IP2 加工规准进行比较。同样查表 2.7-9，表 2.7-13 给出了三种可供选择的满足 IP3 的加工规准比较，表 2.7-14 给出了三种可供选择的满足 IP2 的加工规准比较。

表 2.7-13　满足 IP3 的三种加工规准的对比

加工规准	加工速度 /$mm^3 \cdot min^{-1}$	表面粗糙度 R_{max} /μm	电极损耗比/%
C120	5.6	17	0.7
△C220	8.0	17	1.0
C330	5.9	17	2.0

表 2.7-14　满足 IP2 的三种加工规准的对比

加工规准	加工速度 /$mm^3 \cdot min^{-1}$	表面粗糙度 R_{max} /μm	电极损耗比/%
C110	2.6	13	0.8
△C210	3.2	12	1.7
C320	2.8	11	2.0

通过比较，中加工规准选择 C220、C210 比较合适。由此确定加工条件的转换为：

精 C150→C220→C210→精 C310→C300。

在加工梳形零件时，加工规准选择应注意的问题：粗加工初始条件应选择 IP4 以下，因加工速度相对比较慢，因此按 IP4→3→2→1 逐步递减，逐次修整上一挡的加工面，这样往往能相应地提高精加工的速度。

4）加工进给量和摇动量的计算。表 2.7-15 列出了所选加工规准的各项数值和计算结果，其各项数值的计算如下。

a）各加工规准底面进给量 A 的计算：

由式（2.7-1）：$A = O.V.C_2 + R_{max2} - O.V.C_1 + R_{max1}$，则各加工规准进给量为：

① $A_1 = 120 + 36 - \left(\frac{35+80}{2}\right) + 17 = 156 - 57.5 + 17 = 115.5 \approx 116$

表 2.7-15　各参数之间的关系

加工条件	IP	表面粗糙度 R_{max} /μm	O.V.C α	O.V.C β	O.V.C γ	A 底面进给量	Z 底面基准值	B 侧面进给量	S 侧面基准面	STEP（收缩量）
C150 ↓①	6	36	80	120	160	116	242	92	192	→8
C220 ↓②	3	17	35	80	100	38	126	30	100	→100
C210 ↓③	2	13	30	70	90	37	88	29	70	→130
C310 ↓④	1	6	20	45	60	15	51	12	41	→159
C300 ↓⑤	1	6	20	40	60	36	36	29	29	171

② $A_2 = \left(\frac{35+80}{2}\right) + 17 - \left(\frac{30+70}{2}\right) + 13 = 37.5 \approx 38$

③ $A_3 = \left(\frac{30+70}{2}\right) + 13 - \left(\frac{20+45}{2}\right) + 6 = 36.5 \approx 37$

④ $A_4 = \left(\frac{20+45}{2}\right) + 6 - \left(\frac{20+40}{2}\right) + 6 = 14.5 \approx 15$

⑤ $A_5 = \left(\frac{20+40}{2}\right) + 6 = 36$

b）各加工规准距精加工底面的基准值 Z 的计算：

① $Z_1 = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5 = 116 + 38 + 37 + 15 + 36 = 242$

② $Z_2 = A_2 + A_3 + A_4 + A_5 = 38 + 37 + 15 + 36 = 126$

③ $Z_3 = A_3 + A_4 + A_5 = 37 + 15 + 36 = 88$

④ $Z_4 = A_4 + A_5 = 15 + 36 = 51$

⑤ $Z_5 = A_5 = 36$

c）各加工规准侧面进给量 B 的计算：

由式（2.7-2）：$B = A \times (0.7 \sim 0.8)$，取 0.8，则各加工规准侧面进给量为：

① $B_1 = 115.5 \times 0.8 = 92.4 \approx 92$

② $B_2 = 37.5 \times 0.8 = 30$

③ $B_3 = 36.5 \times 0.8 = 29.2 \approx 29$

④ $B_4 = 14.5 \times 0.8 = 11.6 \approx 12$

⑤ $B_5 = 36 \times 0.8 = 28.8 \approx 29$

d）各加工规准距精加工侧面的基准值 S 的计算：

① $S_1 = B_1 + B_2 + B_3 + B_4 + B_5 = 92 + 30 + 29 + 12 + 29 = 192$

② $S_2 = B_2 + B_3 + B_4 + B_5 = 30 + 29 + 12 + 29 = 100$

③ $S_3 = B_3 + B_4 + B_5 = 29 + 12 + 29 = 70$

④ $S_4 = B_4 + B_5 = 12 + 29 = 41$

⑤ $S_5 = B_5 = 29$

e）各加工规准摇动量 SETP 的计算：

由式（2.7-3）：STEP = CLE − S，电极收缩量 CLE = 200 μm，则各加工规准摇动量为：

① STEP1 = CLE − S_1 = 200 − 192 = 8

② STEP2 = CLES − S_2 = 200 − 100 = 100

③ STEP3 = CLE − S_3 = 200 − 70 = 130

④ STEP4 = CLE − S_4 = 200 − 41 = 159

⑤ STEP5 = CLE − S_5 = 200 − 29 = 171

以上是对各数据的计算结果，下面就可根据计算结果编制加工程序。编制时应注意：①用手动方式设定加工开始位置；②加工深度为 5.00±0.02，由于电火花加工为有损耗加工，故深度应按正公差加工；③使用 G83 指令，记录各加工规准的加工时间，工件、电极找正不计入总加工时间。程序编制如下：




```
文件名：FANGKONG
(      ON OFF MA  IP  SV UP DN LN  STEP PL V   HP PP C  S  L);
C001 = 000 000 00 0000 00 00 00 000  0000  +  00 000 00 00  00 00;
C002 = 000 000 00 0000 00 00 00 000  0000  +  00 000 00 00  00 00;

H000 = 000 + 5020 H001 = 00000000   H002 = 00000000;
H003 = 00000000 H004 = 00000000   H005 = 00000000;
H006 = 00000000 H007 = 00000000   H008 = 00000000;
N000;
C150 LN02 STEP8 SV5 UP1 DN3;
G01 Z 242 - H000 M04;
G83 T001;
C220 LN02 STEP100 SV5 UP2 DN3;
G01 Z 126 - H000 M04;
G83 T002;
C210 LN02 STEP130 SV5 UP2 DN3;
G01 Z 88 - H000 M04;
G83 T003;
C310 LN02 STEP159 SV5 UP2 DN3;
G01 Z 51 - H000 M04;
G83 T004;
C300 LN02 STEP171 SV5 UP2 DN3;
G01 Z 36 - H000 M04;
G83 T005;
M02;
```
注：H000 设定加工深度，H001 ~ H005 记录每一挡加工时间。

3.7 多轴数控电火花成形加工实例

3.7.1 电火花展成法刻字（计算机辅助电火花雕刻）

在模具的制造过程中，经常会遇到图形、文字等的雕刻加工，传统的方法多采用手工雕刻，近年来，利用激光进行雕刻和利用电火花成形电极雕刻的方法得到了广泛应用。通过数控电火花加工机床进行展成雕刻的方法，充分发挥了计算机辅助编程技术及数控电火花加工机床的优势，可加工出各种精美、复杂的图案和文字，在实践中得到了很好的应用。

（1）计算机辅助雕刻程序编程系统

在数控电火花机床上进行展成法刻字，关键在于先要用计算机编程。计算机辅助雕刻编程系统主要由以下几个模块组成，如图 2.7-60 所示。

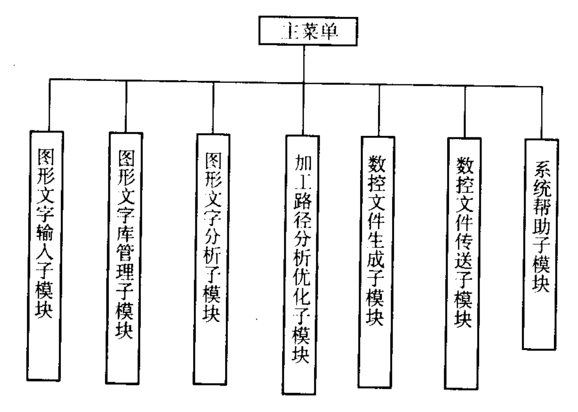


图 2.7-60 计算机辅助雕刻编程系统

1）图形文字输入子模块　图形文字输入子模块完成图形、文字的输入功能，使用者可根据图纸要求进行手工或计算机辅助绘制，或通过扫描仪、数字化仪等设备输入加工的图形，以供系统分析，生成数控文件或存入图形字库。

2）图形文字库管理子模块　图形文字库管理子模块完成对已有的图形、文字的库管理、负责建立新的图形文字库。系统提供一级字库汉字，以及英文、数字和特别图形的基本库，可供使用者自由调用。

3）图形文字分析子模块　图形文字分析子模块完成图形、文字输入点阵文件的矢量化，以供数控文件生成子模块完成图形、文字的转换。

4）加工路径分析优化子模块　加工路径分析优化子模块可对矢量化以后的图形和文字进行数控优化处理。

5）数控文件生成子模块　数控文件生成子模块接受图形文字分析子模块和加工路径分析优化子模块的信息，完成图形和文字的数控程序生成。

6）数控文件传送子模块　数控文件传送子模块完成计算机与数控机床的通信功能。

7）系统帮助子模块　系统帮助子模块完成对于系统使用信息的联机帮助，为使用者提供友好的对话界面。

（2）数控电火花展成法雕刻

数控电火花加工机床作为电火花雕刻机使用，应注意以下几个问题。

1）工具电极的设计　应根据图形、文字的复杂程序以及线条的宽度，选择适当尺寸的电极，过细或过粗尺寸的电极都将影响加工的效率及加工的精度，对于线粗细相差很大的图形和文字应采用多电极的编程加工方法。

2）工具电极损耗的补偿　在电火花放电加工过程中，细小的电极有很大的损耗，应采取措施尽量减小电极损耗并及时使主轴向下进给，进行补偿。可以进行多次重复加工或正反向交替加工。

3）加工规准条件的选择　数控电火花加工机床作为雕刻机使用时，加工规准条件的选择将直接影响加工的成败、效率和精度。应根据具体情况正确选择加工规准条件。

4）一般应有高速旋转功能，即使用 R 旋转轴。

（3）加工实例

图 2.7-61a 为拟加工的图案（桑塔纳大众汽车的商标图案）。电极结构如图 2.7-61b 所示。根据图纸要求图案的线条宽度，取电极工作部分直径为 0.6 mm，或者采用 $\phi0.6$ mm 的空心纯铜管（电火花高速加工小深孔时常用此类铜管作电极）作为工具电极，其长度应尽量短，以保证其有足够的刚度，使其在加工过程中不致弯曲，这一点很重要，直接影响加工的成败。利用计算机图形文字输入，经计算机分析、优化、生成的数控程序从略。

在加工过程中，电极在直径和长度上都会有一定的损耗，如损耗严重，就会引起图案线条宽度和深度不均匀的现象，解决的方法是多次执行同样的程序，进行重复加工。一般经 2 ~ 3 次加工，就可得到精美的图案。

将电火花加工机床作为电火花雕刻机，丰富了数控电火花加工机床的功能，解决了在模具等表面加工图形、文字的雕刻问题。

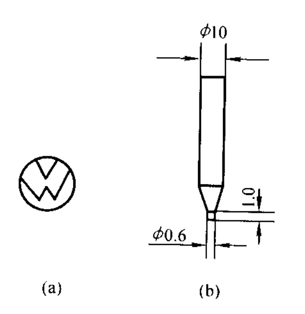


图 2.7-61 数控电火花展成法雕刻

3.7.2 电火花加工螺纹

用数控电火花成形加工机床加工螺纹的方法有两种：①用 *C* 轴加工螺纹——它是用 *C* 轴与 *Z* 轴同时二轴联动的螺旋轨迹合成加工螺纹的方法，适用于无精度要求的螺纹加工。②*Z* 轴锁定加工螺纹——*Z* 轴锁定，利用 *XY* 平面的摇动扩大圆形轨迹加工螺纹的方法，这种加工方法比 *C* 轴加工方法精度高，且简单容易，可加工不通孔螺纹，效率高。

(1) 用C轴加工螺纹

1) 工具电极及工件。

① 工具电极　材料选用铜钨合金（CuW）或纯铜（Cu）。

② 工具电极结构尺寸的形状　螺纹加工时，精加工电极收缩量越小，加工精度越高，但收缩量小，加工速度慢，因此采用粗精两个电极进行加工。在条件允许的情况下，将粗精加工电极制成一件，既提高加工精度，减少两次找正误差，又使加工速度加快。图2.7-62给出了工具电极的形状和尺寸的关系，图2.7-62a为单电极结构，图2.7-62b为制成一体的粗精加工电极结构。工具电极除整体缩小一个收缩量外，其他牙形尺寸、螺距等均不变。

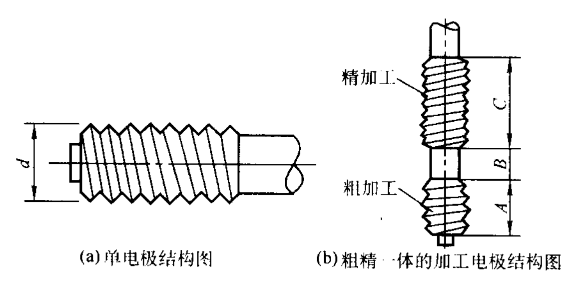


图 2.7-62　电极的形状和尺寸关系

图中 $d = D_1 - 2CLE$

式中，d 为工具电极的外径；D_1 为工件螺纹的大径；CLE为工具电极单边收缩量，粗加工时为0.15～0.30 mm，精加工时为0.03～0.15 mm；A 为粗加工电极长度；B 为空刀槽长度；C 为精加工电极长度。

③ 工件的预加工　图2.7-63给出了工件预加工内孔和螺纹尺寸的关系。

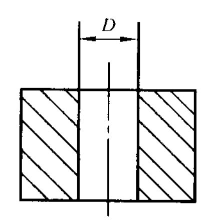


图 2.7-63　工件预加工尺寸和螺纹尺寸关系

图中 $D = D_0 - a$

式中，D 为工件预加工直径；D_0 为工件螺纹的小径；a 为安全余量，约为0.2。

2) 加工程序的编制和输入数据的计算　用C轴加工螺纹的加工程序形式：G01 Z－XXXU±XXXXX；*U*＋时为顺时针，*U*－时为逆时针。

Z、*U* 值的计算方法如下：

$$U = \frac{Z}{L} \times 64\,800$$

$$L = np \text{ 或 } L = \frac{\pi D}{\tan\theta}$$

式中，U 为 C 轴旋转的脉冲数；Z 为 Z 轴的进给量；L 为导程；64 800为 C 轴旋转一圈的脉冲数；n 为螺纹的头数；p 为螺纹的螺距；D 为工件螺纹的中径；θ 为螺旋升角。

3) 利用C轴加工螺纹的示例

① 工件的技术要求　WC硬质合金螺纹模如图2.7-64所示。加工M16×2，长10 mm的内螺纹，加工表面粗糙度 $R_{max} = 5\ \mu m$。预加工孔为 $D = D_0 - a = 13.8 - 0.2 = 13.6$ mm。

② 电极结构和尺寸确定　将粗、精电极做成一体，一次装夹精车，这样不用计算粗、精的起始点。粗加工电极单边收缩量0.15 mm，外径 $d = D_1 - 2CLE = 16.00 - 2 \times 0.15 = 15.70$ mm，长 $A = 10.5$ mm；精加工电极单边收缩量0.05 mm，外径 $d = D_1 - 2CLE = 16.00 - 2 \times 0.05 = 15.90$ mm，长 $C = 11.0$ mm；空刀槽长 $B = 11.0$ mm；如图2.7-64所示。

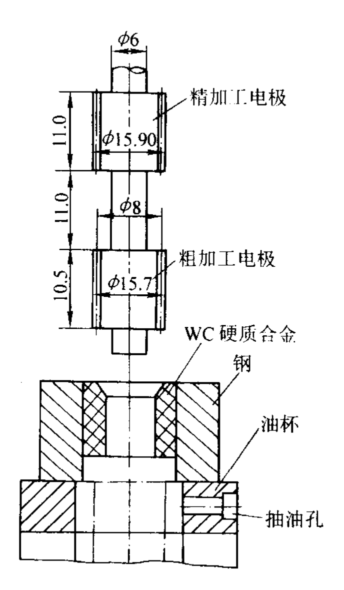


图 2.7-64　硬质合金螺纹模

③ 输入数据的计算　粗加工 *Z* 进给量应以粗加工电极离开工件的下端面为计算长度；$Z = 10.5 + 10.5 = 21$。

$$U = \frac{Z}{L} \times 64\,800 = 21 \times 64\,800/2 = 680\,400$$

精加工 *Z* 进给量应以精加工电极离开工件的下端面为计算长度：

$$Z = 0.5 + 11.0 + 10.0 = 21.5$$

$$U = \frac{Z}{L} \times 64\,800 = 21.5 \times 64\,800/2 = 696\,600$$

④ 加工程序。

文件名：C LUOWEN

(　　ON OFF MA IP SV UP DN LN STEP PL V HP PP C S L)；

C790 = 004 004 01 0310 03 02 05 001 0060　－02 000 10 08 02 03；

C710 = 001 002 00 0020 03 02 05 001 0030　－02 000 10 02 02 03；

H000 = 00000000 H001 = 00000000 H002 = 0000 0000；

G00 G90 G54 X Y Z1.0 U；（在绝对坐标系下，设定电极和工件位置）

C790；（选择粗加工规准）

G01 Z－0；（加工到螺纹的起始点）

G01 G91 Z－21.0 U680400；（在增量坐标系下，*Z* 轴和 *C* 轴联动进行螺纹粗加工）

G83 T001；（记录粗加工时间）

C710；（选择精加工规准）

G01 G91 Z-21.5 U696600 M04；（在增量坐标系下，Z轴和C轴联动进行螺纹精加工，精加工后返回到精加工起始点）

G83 T002；（记录精加工时间）

G01 G91 Z+21.0 U-680400；（在增量坐标系下，返回到粗加工起始点）

T85；（关泵）

M02；（加工结束）

注：H001记录粗加工时间，H002记录精加工时间。

⑤ 加工步骤

a) 将工具电极安装在 C 轴上，以空刀槽处进行找正，不但要找正 X、Y 两方向的垂直度，还要找与 C 轴的同轴度。垂直度误差≤0.01/10.0 mm，同轴度误差≤0.02 mm。

b) 将工件安装在带有抽油装置的油杯上，如图2.7-64所示。

c) 采用3.2节（2）在机检测技术介绍的方法，借助基准球确定电极和工件的中心位置；用端面定位法确定 Z 轴的0点。

d) 调节抽油压力小于1 N/cm²，抽油管不能有大量气泡或缺油的现象，以免抽真空产生放炮；另外抽油压力不宜过大，否则影响加工稳定性。

e) 调用加工程序C LUOWEN，进行加工。

(2) Z 轴锁定加工螺纹

1) 工具电极　结构尺寸和形状见图2.7-65。同样工具电极除整体缩小一个收缩量外，其他牙形尺寸、螺旋角等均不变。

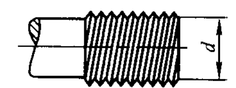


图2.7-65　工具电极结构尺寸和形状

图中 $d = D_0 - a_1$

式中，d 为工具电极的外径；D_0 为工件螺纹的小径；a_1 为安全余量，约为0.3 mm。

2) 工件预加工　图2.7-66给出了工件预加工内孔和螺纹尺寸的关系。

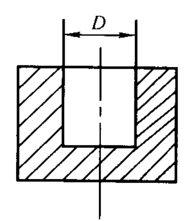


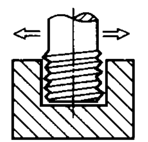
图2.7-66　工件预加工尺寸和螺纹尺寸关系

图中 $D = D_0 - a_2$

式中，D 为工件预加工直径；D_0 为工件螺纹的小径；a_2 为安全余量，约为0.2 mm。

3) 加工要领　Z 轴锁定加工方法是把工具电极下降到预定的深度，随 Z 轴锁定摇动自动扩大轨迹，工件侧面就将产生电极的形状。该方法特别适用于盲孔内加工螺纹和螺栓用螺母的加工。见图2.7-67。

4) 加工实例　在工具钢上加工M16×2，长20 mm的内螺纹。



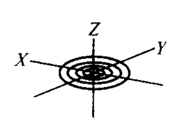


图2.7-67　Z轴锁定加工螺纹的方法

① 工具电极　材料选用纯铜（Cu），形状尺寸见图2.7-68。

工具电极的外径 $d = D_0 - 0.3$ mm，$D_0 = 13.8$ mm $- 0.3$ mm $= 13.5$ mm。

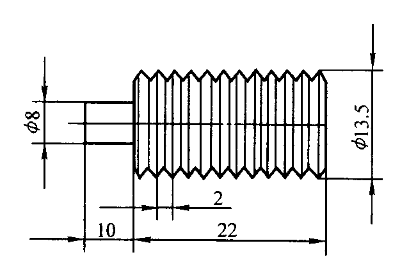


图2.7-68　螺纹工具电极

② 工件　材料选用工具钢（T10），加工表面粗糙度 $R_{max} = 7$ μm，预加工直径 $D = D_0 - a_2 = 13.8 - 0.2 = 13.6$ mm，预加工深度20.1 mm。

③ 单边摇动量 = (16 - 13.5) /2 = 1.25 mm。

④ 加工程序　加工条件和摇动量选择如表2.7-16。

表2.7-16　加工条件和摇动量

C***	ON	IP	HP	PP	UP	DN	STEP
C121	014	0035	051	01	02	03	1150
C111	012	0025	051	01	02	03	1182
C311	009	0015	051	01	02	03	1210
C310	008	0010	051	10	02	03	1230

文件名：ZLOCKLUOWEN

(　ON OFF MA IP SV UP DN LN STEP PL V HP PP C S L)；

C121 = 014 014 02 0035 06 02 03 201 1150 + 01 051 01 00 02 03；

C111 = 012 012 02 0025 06 02 03 201 1182 + 01 051 01 00 02 03；

C311 = 009 037 01 0015 05 02 03 201 1210 + 01 051 01 00 02 03；

C310 = 008 008 00 0010 05 02 03 201 1230 + 01 051 10 00 02 03；

H000 = 00 + 20100 H001 = 00000000 H002 = 00000000；

H003 = 00000000 H004 = 00000000 H005 = 00000000；

H006 = 00000000 H007 = 00000000 H008 = 00000000；

G00 G90 G54 X Y Z1.0；

G25；

G01 Z-H000；

C121 G01 Z -H000；

G83 T002；

C311 G01 Z-H000；

G83 T003；

C310 G01 Z-H000；

G83 T004；

G01 Z1.0；

T85;

M02;

注：H000设定加工深度，H001～H004记录每一挡加工时间。

⑤ 加工步骤同利用C轴加工螺纹。

3.7.3　使用 *C* 轴的多孔加工

使用 *C* 轴进行角度分度，可实现用一根电极进行极坐标的多孔加工。

(1) 分度和旋转方向的确定

旋转方向：*U*+为反时针方向；*U*-为顺时针方向。

分度：程序中用转动的脉冲数输入，一转分64 800脉冲，则输入的脉冲数值（*U*）与旋转角度（θ）的关系：

$$U = 64\,800 \times \theta / 360°$$

例如：反时针方向旋转10°　$U = 64\,800 \times 10°/360° = 1\,800$，则输入G00 U+1800。如输入为G00 U-8100时，则顺时针方向旋转的角度 $\theta = 360° \times U/64\,800 = 360° \times 8\,100/64\,800 = 45°$

(2) 在程序编制时，改变角度后必须输入【M07】指令以锁定 *C* 轴，否则会引起错位。执行随后的 *C* 轴旋转指令会自动解除锁定。

(3) 加工示例：如图2.7-69所示，用粗、精两个电极在模具上8等分加工深10 mm的型腔。

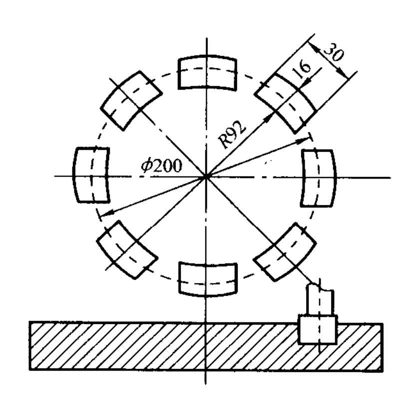


图2.7-69　使用C轴的多孔加工

① 工具电极　材料纯铜（Cu），粗电极单边摇动量280，精电极单边摇动量100；形状和尺寸见图2.7-70。

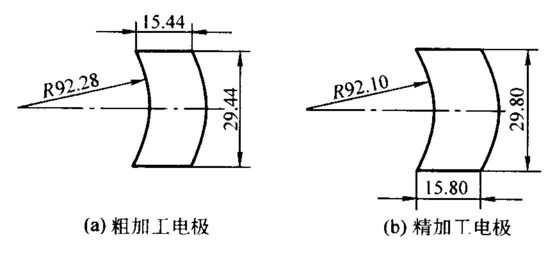
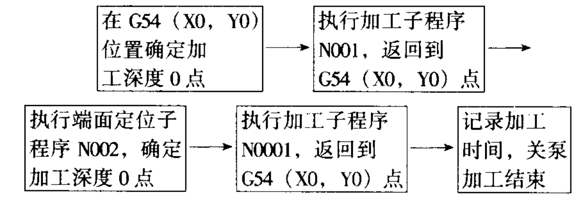


图2.7-70　粗精加工电极

② 工件要求　材料CrWMn，热处理C52，表面粗糙度 $R_{max} = 7\ \mu m$，预加工单边留量1～2 mm，预加工深度9.5 mm。

③ 设定坐标系　G54为加工坐标系，G55为基准球坐标系。

④ 编制加工程序　根据3.6节的选择方法，粗加工规准可选用C160或C270，因采用两个电极、考虑时侧重加工速度，故选用C270。C270的加工性能为：加工速度0.56 mm³/min，表面粗糙度 $R_{max} = 45\ \mu m$，电极损耗比0.8%。加工深度9.70 mm。因为多孔加工，故要考虑电极损耗，8孔加工后电极损耗约为：总加工深度×0.8% = 9.7×8×0.008 ≈0.621 mm。可采用循环两次加工补偿电极损耗值。程序编制流程：



粗加工程序：文件名：CU DUOKONG

```
(      ON OFF MA IP SV UP DN LN STEP PL V HP PP C S L);
C001 = 000 000 00 0000 00 00 00 000 0000 + 00 000 00 00 00 00;
C002 = 000 000 00 0000 00 00 00 000 0000 + 00 000 00 00 00 00;
H000 = 000 + 9700 H001 = 00000008 H002 = 00000000;
H003 = 00000000 H004 = 00000000 H005 = 00000000;
H006 = 00000000 H007 = 00000000 H008 = 00000000;
G00 G90 G54 X Y Z1.0;
M98 P0001;
M98 P0002;
M98 P0001;
G83 T002;
T85;
M02;
子程序 N0001:(加工位置确定)
G00 X100. YO M98 P0003;
G00 X70.7 Y70.7 M98 P0003;
G00 X0 Y100.M98 P0003;
G00 X-70.7 Y70.7 M98 P0003;
G00 X-100. Y0 M98 P0003;
G00 X-70.7 Y-70.7 M98 P0003;
G00 X0 Y 100. M98 P0003;
G00 X+70.7 Y-70.7 M98 P0003;
G00 X0 Y0;
M99;
子程序 N0003:(加工和旋转角度确定)
C270 G01 Z-H000 M04;
G91 G00 U64 800/H001;(在增量坐标系下，转动的脉冲64 800/8)
M07:(锁定C轴)
G90;(返回绝对坐标系)
M99;
子程序 N0002:(端面定位)
G90 G54;
G80 Z-;
G92 Z;
M05 G00 Z+1.0;
M99;
```

注：H000设定加工深度，H001设定加工等分的孔数，H002记录粗加工时间。

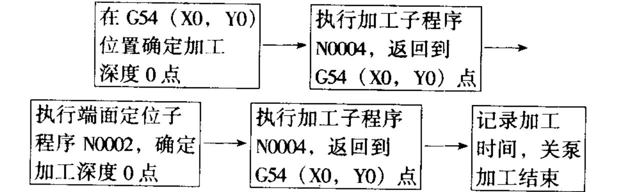
根据3.6节的选择方法，精加工规准选用C110→C100，因采用两个电极，考虑时侧重电极损耗，故均选用无损耗规准。C110的加工性能为：加工速度0.02 mm³/min，表面粗糙度 $R_{max} = 12\ \mu m$，电极损耗比0.8%。C100的加工性能为：加工速度0.004 mm³/min，表面粗糙度 $R_{max} = 6\ \mu m$，电极损耗比0.1%。加工进给量和摇动量的计算结果见表2.7-17。



表 2.7-17 加工进给量和摇动量 /mm

加工条件	IP	表面粗糙度 R_{max} /μm	O.V.C α	β	γ	A 底面进给量	Z 底面基准值	B 侧面进给量	S 侧面基准面	STEP（收缩量）
C110	2	12	15	60	80		94		76	24
↓①						58		47		
C100	1	6	10	30	50		36		29	71
↓②						36		29		

程序编制流程：



精加工程序：文件名：JING DUOKONG

```
(     ON OFF MA IP SV UP DN LN STEP PL V HP PP C S L);
C001 = 000 000 00 0000 00 00 00 000 0000 + 00 000 00 00 00 00;
C002 = 000 000 00 0000 00 00 00 000 0000 + 00 000 00 00 00 00;
H000 = 00 + 10000 H001 = 00000008 H002 = 00000000;
H003 = 00000000 H004 = 00000000 H005 = 00000000;
H006 = 00000000 H007 = 00000000 H008 = 00000000;
G00 G90 G54 X Y Z1.0;
C110 STEP24 LN001 H003 = 94 - H000;
M98 P0004;
M98 P0002;
C100 STEP71 LN001 H003 = 36 - H000;
M98 P0004;
G83 T0002;
T85;
M02;
子程序 N0004：（加工位置确定）
G00 X100. Y0 M98 P0005;
G00 X70.7 Y70.7 M98 P0005;
G00 X00 Y100. M98 P0003;
G00 X - 70.7 Y70.7 M98 P0005;
G00 X - 100. Y0 M98 P0005;
G00 X - 70.7 Y - 70.7 M98 P0005;
G00 X0 Y - 100. M98 P0005;
G00 X + 70.7 Y - 70.7 M98 P0005;
G00 X0 Y0;
M99;
子程序 N0005：（加工和旋转角度确定）
G01 Z94 - H003 M04;
G91 G00 U64 800/H001;（在增量坐标系下，转动的脉冲 64 800/8）
M07;（锁定 C 轴）
G90;（返回绝对坐标系）
M99;
子程序 N0002：（端面定位）
G90 G54;
G80 Z - ;
G92 Z;
M05 G00 Z + 1.0;
M99;
```

注：H000 设定加工深度，H001 设定加工等分的孔数，H002 记录精加工时间，H003 实际加工深度。

⑤ 加工步骤

a）用测量球确定基准球和加工中心的坐标值（X，Y），找正方法同 3.2 节（2）在机检测技术。

b）安装粗加工电极并找正，找正方法同 3.2 节（2）在机检测技术。

c）调用粗加工程序：CU DUOKONG 进行加工。

d）安装精加工电极并找正，找正方法同 3.2 节（2）在机检测技术。

e）调用精加工程序：JING DUOKONG 进行加工。

3.8 数控电火花成形加工机床的编程和选择规准举例

下面对在日本三菱公司的电火花加工机床上如何编制各种类型加工程序及加工时电规准的选择加以介绍。

3.8.1 编程

日本三菱公司数控电火花成形加工机床（型号为 M35）采用国际通用 ISO 代码进行编程，其中，G 表示准备功能；M 表示辅助功能；E 表示电规准，X、Y、Z 表示三轴的走向；C 表示主轴分度、旋转等，现根据加工要求列举几种编程方法和程序。

（1）普通加工（Z 轴方向伺服进给）

如图 2.7-71 所示，在工件上加工出深 10 mm 的型孔，其程序编制为：

```
G92X0Y0Z0C0;
G90G11F200;
M88M80;
E9906;
M84;
G01Z - 10.0;
M85;
M25G00Z100.0;
M02;
```

说明：G92 为零点设定；G90 为绝对坐标系、G11 为半固定轴模式、F 为移动速度；M88 为快速冲工作液、M80 为工作液体流动；E 为电规准；M84 为脉冲电源开；G01 为直线走向；M85 为脉冲电源关；M25 为取消电极与工件接触、G00 快速抬刀；M02 为加工程序结束。

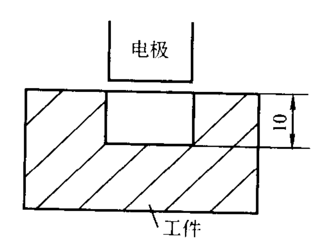


图 2.7-71 普通型腔加工

（2）横向加工（水平方向伺服进给）

如图 2.7-72 所示，横向加工出一个深 5 mm 的小槽坑，其程序编制为：

```
G90G11F200;
M88M80;
E9904;
M84;
```




```
G01X-5.0;
M85;
G01Z-20.0;
M85;
G13X5;
M84;
G01X-5.0;
M85;
M25G01Z0;
G90G00Z100.0;
M02;
```

说明：G13 为横向或纵向伺服；X5 为 X 方向第 5 挡速度。

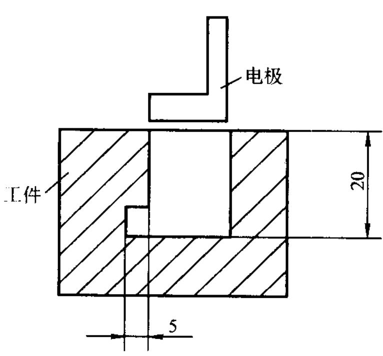


图 2.7-72　*X* 轴向加工

(3) 摇动加工

如图 2.7-73 所示，修光孔 $\phi 12$ mm × 10 mm 的侧壁和孔底，其程序为：

```
G90G11F200;
M88M80;
E9905;
M84;
G01Z-10.0;
G26L9801N104R0Q750P8;
M85;
M25G00Z100.0;
M02;
```

说明：G26 为摇动，L 为子程序，N 为子程序段落，R 为摇动开始尺寸；Q 为摇动结尾尺寸，P 为次数；摇动开始尺寸 R=0；摇动结尾尺寸 Q=（12-10.5）/2=0.75 mm=750 μm。

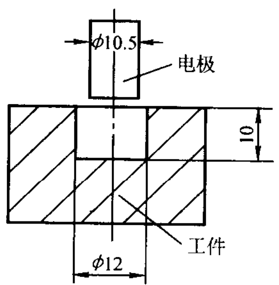


图 2.7-73　摇动加工

(4) 锥孔摇动加工

如图 2.7-74 所示，用 $\phi 11.6$ mm 圆柱工具电极加工出圆锥孔，其程序为：

```
G90G11F200;
M88M80;
E9906;
M84;
G90G01Z0;
G26L9801N105R1000Q200Z-20.0P10;
M85;
G90G00Z100.0M25;
M02;
```

说明：摇动开始尺寸 R=（14-12）/2 =1 mm=1 000 μm；摇动结尾尺寸 Q=（12-11.6）/2=0.2 mm=200 μm。

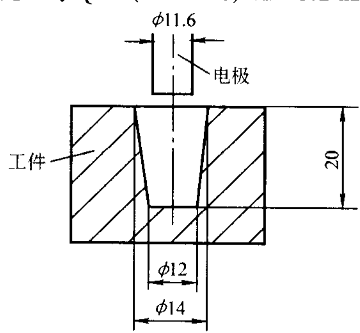


图 2.7-74　锥孔摇动加工

(5) 内螺纹加工（M10）

如图 2.7-75 所示，用 Z 轴和 C 轴联动加工，其程序为：

```
G92X0Y0Z0C0;
G10F50;
M88M80;
M9905;
M84;
G90G01Z-15.0C-3600;
M85;
M25G90G01Z0C0;
G00Z100.0;
M02;
```

说明：M10 为螺纹，螺距 $t=1.5$，则 $Z=10\times1.5=15$；旋转轴 C 共需转过的角度 $=360°\times15/1.5=3\,600°$。

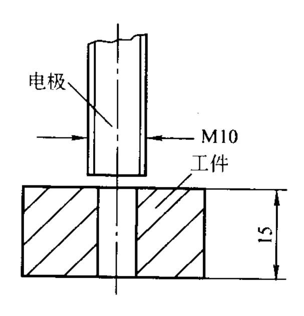


图 2.7-75　内螺纹加工

(6) 内斜齿加工

如图 2.7-76 所示，*Z* 轴和 *C* 轴联动加工，其程序为：

```
G92X0Y00Z0C0;
G90G10F50;
M88M80;
E9903;
M84;
G90G01Z-22.0C-30.642;
M85;
E9906;
M84;
G90G01Z-45.0C-62.308;
G04X1000;
```

G01Z0C0;
M85;
G90G00Z50.0;

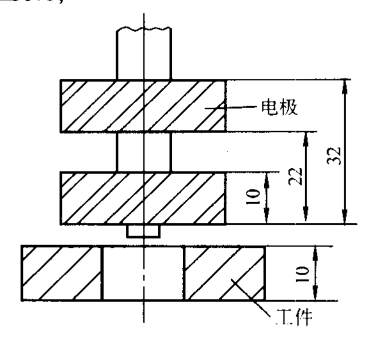


图 2.7-76　斜齿加工

M02;

说明：G10 为固定轴，G04X1000 为 X 方向暂停，单位为 s；斜齿的导程 L = 260 C1 = 360° × 22/260 = 30.462°；C2 = 360° × 45/260 = 62.380°。

以上是几种类型的编程，此外还可编等分转角加工程序、自动换电极加工程序以及电极偏心自动测量等。有了程序，在进行加工前还要选择电规准。

3.8.2　规准选择（E 为电规准）

在加工任何塑料型腔模时，它的尺寸精度、表面粗糙度都应达到图纸要求，所以选择电规准是非常重要的。三菱 EDM 机床是根据不同电极材料、工件材料和不同的电极损耗要求，共有 8 种加工条件组，如铜对钢、石墨对钢等。

下面就以子程序 L9801（表 2.7-18）铜对钢低损耗为例加以叙述。

表 2.7-18　L9801 铜对钢低损耗加工

加工条件 No		100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110
加工表面粗糙度 $R_{max}/\mu m$		65	50	45	35	25	20	14	12	9	8	4
电极单边最小缩放/μm		350	300	250	200	150	100	80	70	60	40	20
I_p（ΔI_p）		6（5）	5（5）	4（5）	3（5）	2（5）	2（3）	1（5）	1（4）	1（3）	1（3）	1（3）
ON（ΔON）		10（0）	9（5）	8（5）	8（0）	7（0）	6（5）	6（0）	6（0）	6（0）	4（0）	1（0）
OFF（ΔOFF）		6（0）	6（0）	6（0）	6（0）	6（0）	6（0）	6（0）	6（0）	7（0）	5（0）	2（0）
F 回路		0	0	0	0	0	0	2	2	2	2	2
排屑调节		ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON	ON
POL		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
SH 回路		OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
摇动加工	H57	600	500	350	250	200	160	120	100	80	50	30
	H58	280	220	150	120	100	70	60	50	40	30	20
	H59	350	300	250	200	150	100	80	70	60	40	20
	H60	180	140	100	80	60	50	40	35	35	25	20
JUMP	Down	4	4	4	4	4	4	2	2	2	2	2
	Up	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
GAIN		60	60	60	60	50	50	50	50	50	50	40
E 电规准		9901	9902	9903	9904	9905	9906	9907	9908	9909	9912	9913

表 2.7-18 中：

1）I_p（ΔI_p）为脉冲电流挡位调节。其中 I_p 共分 6 挡可调，ΔI_p 分 5 挡可调。I_p（ΔI_p）组成脉冲电源的输出峰值电流，如表 2.7-18 中，加工条件 N104，输出电流峰值 = $I_p \times (\Delta I_p) = 2 \times 5 = 10A$。

2）ON 和 ΔON 为脉冲宽度挡位调节。其中，ON 分 12 挡可调，ΔON 分 10 挡，ON 为粗调挡数，ΔON 为细调挡数，计算公式为脉冲宽度 = 2（1 + 5/10）μs。

例如，ON 分 6 挡，ΔON 为 5 挡，则脉冲宽度 = 2（1 + 5/10）μs = 96 μs

3）OFF（ΔOFF）为脉冲停歇时间挡位调节。其中，OFF 分 12 挡可调，ΔOFF 分 10 挡，OFF 为粗调挡数，ΔOFF 为细调挡数，计算公式为脉冲停歇时间 = 2（1 + ΔOFF/10）μs

例如，OFF 为 4 挡，OFF 为 0 挡，则脉冲停歇时间 = 2（1 + 0/10） = 16 μs

4）F 回路用来提供宽脉冲小电流。

5）POL 为电极的极性，"+"号为正极性，"−"号为负极性。

6）JUMPU 与 JUMPD 为电极抬刀。JUMPU 表示抬刀高度，分 10 挡可调，JUMPD 表示抬刀周期，分 10 挡可调。

7）GAIN 为调整伺服放大器的放大倍数。

8）H57、H58、H59、H60 的选用。H57 ~ H60 用于摇动加工，其中 H57 为底面过渡间隙，H58 为底面最终间隙，所谓过渡间隙指的是，如果这挡电规准不是最终加工条件，为了对这挡加工表面进行修光，在加工时必须为后挡加工留出余量，所以 H58 才是这挡电规准的实际底部间隙值。

根据表 2.7-18 中的子程序 L9801 可以看出，人们可以加工出型腔很粗的麻面，同时也可加工出很光的表面，工艺范围较宽。

4　电火花铣削加工技术

4.1　电火花铣削加工技术的产生及特点

传统的电火花成形加工是利用成形工具电极对工件进行"拷贝"加工，它的优势体现在复杂或不规则型腔以及窄、微、薄结构的加工上。与切削加工相比较，电火花成形加工

较好地解决了模具材料的难加工性和加工型腔（或形面）的复杂性等问题。因此，电火花成形加工长期在型腔模具的制造中占据重要地位。但是随着现代生产和制造技术的发展，电火花成形加工面临一系列的挑战，突出表现在以下几个方面。

首先，随着机床与刀具技术的发展，PCBN（聚晶立方氮化硼）及PCD（聚晶金刚石）等新型刀具材料的出现，使得难加工金属材料的切削加工正在某些场合替代电火花加工，并取得了良好的效果。例如对于淬硬钢工件的型腔与轮廓加工，过去一直为电火花加工所垄断，然而近年来除了窄缝、深槽及细致的纹理不得不采用电火花加工外，一般型腔与三维轮廓已可以在高刚度的铣床与加工中心上采用超硬材料的涂层铣刀进行高速铣削加工。英国NCMT在日本牧野公司的加工中心上采用牧野开发的数据存储器制造模具，与采用电火花加工相比，能显著节省生产准备时间与加工时间，并改善了表面粗糙度。先进的热处理工艺和高速旋转主轴使得刀具寿命大为提高，加上多轴联动的数控技术和日益完善的CAD/CAM技术，高速铣削技术正越来越多地应用于淬硬工件模具的加工中，而且它的加工速度更快，成本更低。传统的电火花成形加工面临着这些新技术的挑战。

其次，现代产品种类繁多、批量相对变小而且更新换代快的特点，使得制造业（尤其是模具制造业）的生产模式也必须进行相应的调整。只有将先进的柔性生产技术、灵活的虚拟组织结构和高素质的人员结合在一起，才能使企业立足于市场，具有较强的应变能力。柔性生产技术是企业实现快速响应的关键之一，而传统的电火花成形加工却难以胜任这种柔性的生产模式。主要问题是需要制造成形电极，加工不同的工件需准备不同的成形电极。复杂的成形电极的设计和制作占用了大量的时间，不但使得产品的加工周期变长，而且大大地提高了电火花成形加工的成本。通常制造一套模具，电极制作费用可达总费用的一半以上，况且还有形状复杂或微小的电极难于制作等问题。因此，成形电极的设计和制作是电火花成形加工缺乏柔性的主要原因。

再次，电火花成形加工中工具电极不可避免地产生损耗，尤其在边角处的损耗，一般是难以补偿的，而且在微细电火花加工中，电极的相对损耗更大。电火花加工过程中不可避免的电极损耗现象，决定了用同一成形电极完成高精度型腔粗、精加工全过程的不现实性。因此加工一个工件往往需要准备几个电极，提高了加工费用和生产准备时间。在微细电火花加工中，形状复杂的成形工具电极可能产生破坏性的损耗，工具电极形状的改变使得补偿无法进行，更无法获得预定的加工形状。因此，在微细加工中，特别是在深径比较大的复杂型腔加工中，成形加工将很难胜任。

随着制造业的发展以及人们对电火花加工技术研究的深入，自20世纪90年代后，国内外众多学者纷纷开始尝试使用简单形状的电极（如棒状电极），在数控系统控制下按照一定轨迹作成形运动，通过简单电极与工件之间的不同相对位置（刀位）的放电，借鉴数控铣削的方法进行三维轮廓的电火花铣削加工。

电火花铣削加工技术的出现给传统电火花成形加工所带来的影响是十分巨大的，对产品的电火花加工工艺流程将产生重要影响。表2.7-19以对比的方式描述了采用电火花铣削加工和传统电火花成形加工制造模具的工艺流程。

与传统电火花成形加工相比，电火花铣削加工技术具有如下优点。

1）电火花铣削加工可以解决传统成形加工有困难、甚至无法加工的任务。如由复杂圆弧直线组成的又长又深的窄槽，这是传统成形加工难以胜任的。

表 2.7-19　传统电火花成形加工和电火花铣削加工比较

传统 EDM 加工	EDM 铣削加工
工件 CAD ↓ 电极 CAD ↓ 电极加工编程 ↓ 制造电极 ↓ EDM 成形加工编程 ↓ 成形加工	工件 CAD ↓ EDM 铣削加工编程 ↓ EDM 铣削加工

2）电火花铣削过程中，可有效地解决由于采用复杂形状成形电极而造成的电极损耗不均匀及加工间隙中工作液流场不稳定等问题，并大大地简化电极损耗的补偿策略。

3）在电火花铣削加工过程中，电极高速旋转以及相对放电位置的不断改变等都可以改善放电条件，从而使得加工稳定，可以有效地避免电弧放电和短路现象的产生。

4）在传统的成形加工中，随着加工面积的增大，由于电容效应的作用，很难获得较高的表面质量。而采用简单电极的电火花铣削加工，则可在保持相对较小加工面积的状态下进行加工，从而可有效地减小电容效应，获得更好的表面质量。

电火花铣削加工技术的出现，给电火花成形加工提供了一个崭新的思路，使得现代飞速发展的CAD/CAM技术、柔性制造技术、网络制造技术等能更好地融入到电火花加工中。同时，由于电火花加工时电极与工件之间没有宏观作用力，因此其工具电极可视加工需要而有旋转、分度（如用方形电极加工多边形）或不转（如用方形电极加工方腔）等多种运动形式，这种主轴运动的多样性是机械铣削加工所无法比拟的。图2.7-77是几种典形的电火花铣削加工示意图。

图中a、b、c、d采用圆柱电极，加工中电极可以高速旋转。如采用方形电极，则电极不旋转，可加工清棱清角的表面。e、f分别采用线框电极和板状电极进行加工，加工中电极不旋转，前者可用于有大量工件材料需要去除的加工场合，后者同时可利用旋转分度轴进行数控分度加工。

4.2　电火花铣削加工中的电极损耗补偿技术

从运动方式分析，电火花铣削加工并不难实现，它与机械铣削加工有着极为类似的运动方式，但二者又有很大的区别。电火花加工是一种非接触性加工，电极与工件之间存在着放电间隙，而且在加工过程中存在较大的电极损耗，直接影响加工精度。由于受许多因素影响，电极损耗规律较为复杂，电极损耗的补偿是实现电火花铣削加工的关键技术之一。

4.2.1　对电极损耗采取的策略

对电火花加工中的电极损耗，一般可采取减小电极损耗、对损耗后的电极进行修整、更换电极以及电极损耗的在线补偿等策略。

1）减小电极损耗　尽量减小电极损耗，在能够满足加工精度要求的前提下，使能忽略电极损耗对加工精度的影响，是各国学者的研究目标之一。选用相对损耗较小的电极材料、充分利用电火花加工中的各种效应、对放电波形进行调整与控制、选用适当的放电参数以及合理地选用工作液及其供给方式等是从原理上降低电极损耗的根本途径。

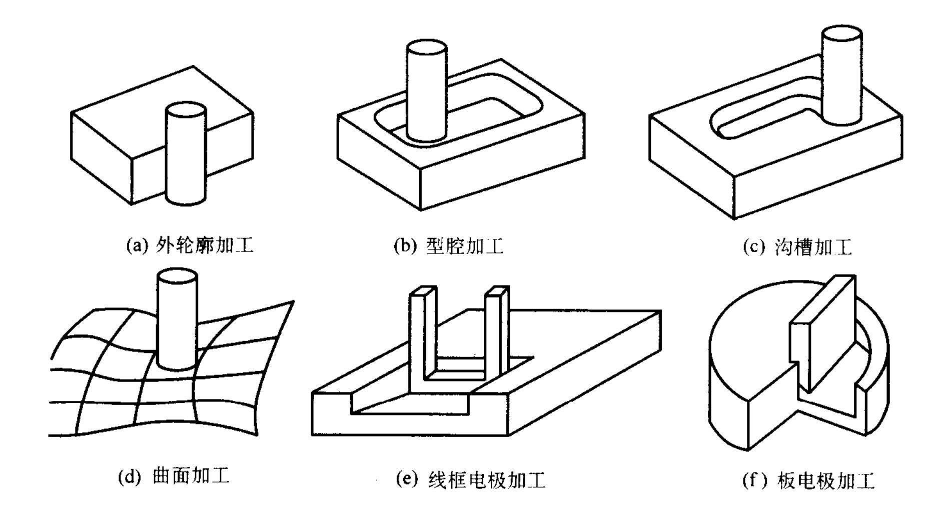


图 2.7-77　电火花铣削加工的几种形式

在电火花铣削加工中，由于电极有效放电面积比工件截面积小得多，电极损耗对加工精度的影响也大得多。

以简单电极铣削直孔型腔为例，电极损耗率 θ：

$$\theta = V_e / V_W = S_e h_e / (S_W h_W)$$

可得，

$$h_e = \frac{S_W}{S_e}\theta h_W \tag{2.7-4}$$

式中，S_e 为简单电极横截面面积（即电极有效放电面积）；S_W 为型腔横截面面积（$S_W \geqslant S_e$）；h_e 为电极损耗长度（不考虑电极的边角损耗）；h_W 为型腔加工深度（如底面不平，应是平均深度）。

当 $S_e = S_W$ 时，相当于传统的成形加工；在电火花铣削加工中，S_W 将远大于 S_e。由式（2.7-4）可知，在电极损耗比相同的情况下，加工同等深度的型腔，采用电火花铣削加工时电极被蚀除（损耗）的长度比采用传统的电火花成形加工大得多，电极损耗所造成的误差也将大得多（在没有补偿的情况下）。可以认为，在电火花铣削加工中，型腔与电极横截面积之比 S_W/S_e 对电极损耗所产生的误差起到了放大作用，它加大了电极损耗对加工精度的影响。因此，在电火花铣削加工中，仅靠减小电极损耗是满足不了要求的。

2）电极的修整和更换　加工中由于各部分损耗不均匀，使得电极原有的完整形状（如尖角部分）被破坏，会影响工件的形状精度。通过适当的电极修整，可以恢复损耗前的简单电极形状。

电极的修整可在电火花加工机床上实现。工具电极工作一段时间后，暂停加工，让它与另一电极（修整用电极）进行放电加工，以达到修整电极的目的。这种工具电极在本机上不离开主轴进行修整的方式，称为在位修整。也可以采用离线修整的方式，将损耗后的电极卸下，在其他数控机床上或采用手工修复电极。显然，离线修整对工具电极的重新装夹及定位有更高的要求，容易产生二次装配误差，会对加工精度造成不利影响，而在位修整则不存在这个问题。

电极损耗的在位修整一般是采用反拷块或 WEDG 技术对损耗部位进行修整或去除，以使电极始终保持所需的规则形状。该方法具有效率低、精度差等明显的缺点。

4.2.2　电极损耗的在线补偿

由上面的分析可以看出，不管是减小电极损耗，还是电极的修整或更换，都不是解决电火花铣削加工中电极损耗问题的最佳途径，只有在线补偿才是解决电极损耗问题的根本策略。

在利用简单形状电极的电火花铣削加工过程中，电极损耗的在线补偿通常是基于"检测 - 刀位补偿"的原理进行的。即在机床上装有 CCD 传感器，在加工中的某一阶段，将工具电极抬起进行电极损耗尺寸及形状测量，根据测量结果进行刀位的补偿。由于电极截面形状简单，加之电极的旋转运动，因此理论上讲，电极的损耗具有相当的规律性，呈轴对称分布。这使电极损耗的在线补偿成为可能。图 2.7-78 是用简单圆柱形电极进行斜面电火花铣削加工时的电极损耗及其补偿情况。

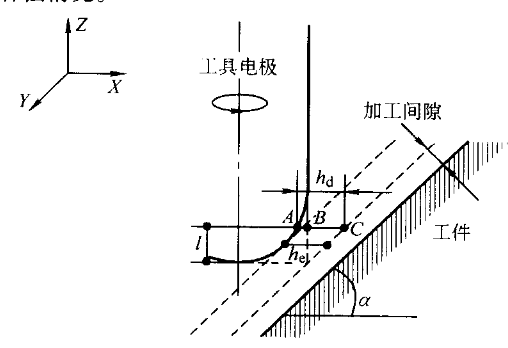


图 2.7-78　电火花铣削时的电极损耗及其补偿计算

加工中电极的轴向补偿量可直接用其损耗量 l 带入，而其径向补偿量则需根据所测得的其半径方向的损耗量 r_W（图中的 AB）、刀位及工件形状等计算确定：

$$h_d = AB + BC = r_W + l\tan^{-1}\alpha \tag{2.7-5}$$

式中，h_d 为 l 处电极表面与工件间的距离（X 方向）；r_W 为电极的径向损耗量；α 为加工面的倾角。

由于放电发生在极间距离最近处，因此电极损耗的径向补偿量应为 h_d 的最小值，即图中的 h_e。通常认为，复杂三维曲面可分解为一系列微小斜面，因此理论上讲，通过上式即可实现三维曲面电火花铣削加工时的电极损耗在线补偿。但应该看到，上述过程是建立在严格的检测基础上的，而在电火花加工过程中电极形状的检测既费时又很难精确化；同时电极损耗的过程极为复杂，尽管采用旋转电极，其损耗形状也很难成为轴对称形。因此，为使简单形状电极电火花铣削加工技术真正达到实用化，必须从方法及电极损耗补偿策略上进行更进一步的研究。

4.3　基于分层制造的电极等损耗电火花铣削加工技术

4.3.1　电火花加工中的电极等损耗概念

为简化电火花铣削过程中的电极损耗补偿策略，实现电

极损耗的在线补偿，20 世纪 90 年代后期日本东京大学生产技术研究所的增泽隆久、余祖元等在研究电火花微细加工时率先提出了电极等损耗的概念，并进行了实验验证。之后，日本松下电机、瑞士夏米尔公司等也相继开展了此技术的应用研究，取得了良好的效果。电火花加工中的电极等损耗原理对于提高电火花加工精度、简化电极损耗补偿策略，进而促进电火花铣削加工技术在三维结构制作上的实用化无疑具有十分重要的理论与实用意义。

用简单形状电极实现电火花铣削加工的方法主要有电极侧面放电和底面放电两种形式，如图 2.7-79 所示。图 2.7-79a 的方式是通过电极侧面放电进行加工。为减少电极损耗的影响，加工过程中，应尽量采用低损耗的加工条件，如对供液方式、电极材料、电脉冲参数等一系列环节进行优化。但尽管如此，由于存在较大面积的侧面放电，电极参与放电部位及其尖角棱边处仍会出现较大的不均匀损耗及形成损耗圆角，进而影响加工精度。而且由于电极损耗的不均匀性，使得电极损耗的补偿极为困难。图 2.7-79b 则采用电极端面放电方式进行逐层扫描加工，以期将电极损耗控制在电极端面，从而简化电极损耗的补偿策略。目前，这种加工方式已在轮廓的电火花加工中得到了极为成功的应用。

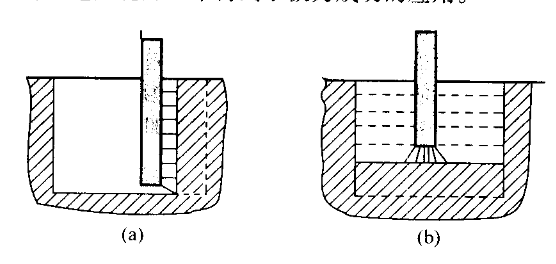

(a) (b)

图 2.7-79 两种电火花铣削加工方式

事实上，在利用电极端部放电进行加工时，电极的端部形状仍会出现如图 2.7-80a 所示的损耗现象，其端部的尖角棱边处将会出现较大的损耗圆角，这对高精度的微细加工是极为不利的。既然在电火花加工过程中，电极的损耗现象是不可避免的，那么如果能通过某种措施使电极端部各点的损耗量均匀，即达到所谓的等损耗，如图 2.7-80b 所示，则就可在加工过程中，通过电极的轴向补偿运动得到极高的加工精度。电极等损耗电火花加工的概念正是基于这种思路而提出的。

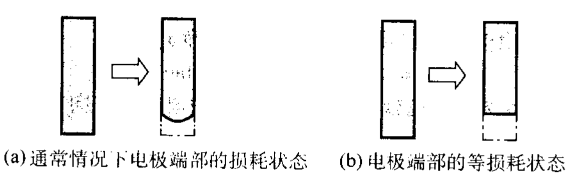

(a) 通常情况下电极端部的损耗状态　(b) 电极端部的等损耗状态

图 2.7-80 电极端部的损耗

4.3.2 电极等损耗电火花铣削加工的基本原理

为实现图 2.7-80b 所示的电极等损耗状态，加工过程中，除应尽量采用低损耗的加工条件外，每一层的加工厚度还应小于放电间隙，以将放电过程局限于电极底面。此时电极的损耗也将只发生在电极底面，从而可有效地避免电极侧面及尖角损耗。图 2.7-81 示意了电极与工件间做直线扫描运动而无轴向进给时，电极端部的损耗情况分析。在加工初始阶段，电极底面的锐边处，由于尖端放电而出现变钝现象，随着运动的继续，放电间隙逐渐拉大，放电点逐渐减少并发生在极间距离最近处，变钝圆角将逐渐减小直到消失，进而恢复电极的理想形状，此时极间将不再有放电现象。重复上述扫描运动，将可完成电极等损耗电火花加工。

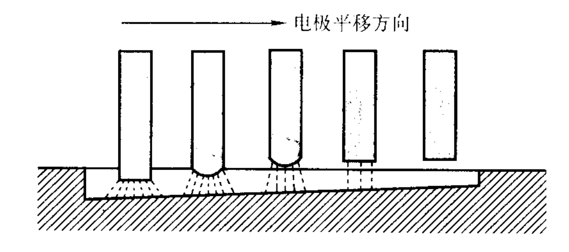


图 2.7-81 电极平动时端部的损耗过程

电极损耗的上述规律，将大大简化电火花铣削加工中的电极损耗补偿策略，进而提高轮廓的加工精度。在一定加工条件下，可以较容易地得到电极形状从变钝到恢复的周期。这样，在加工过程中，就可以根据工件的尺寸和形状，适当控制扫描运动速度和电极的轴向补偿量，从而实现电极等损耗的电火花铣削加工。如果加工时电极转动，则效果更好。

4.3.3 基于分层制造原理的电火花铣削加工技术的实现

实现分层电火花铣削必须遵从以下几点：即将放电过程局限在电极底面、合理的电极运动轨迹规划、适当的电极损耗轴向补偿。

（1）采用电极底面放电方式

利用电极底面放电的分层电火花铣削过程可用图 2.7-82 示意。采用这种方式，可以充分地发挥机床的数控功能及相应的分层信息处理技术，同时可将放电过程局限在电极底面，从而简化电极损耗的补偿。但对于三维形面而言，其加工表面轮廓是由一系列二维平面叠加而成，因此在加工轮廓表面将不可避免地存在的微小台阶形误差。为减小这种分层误差，一方面可以减小分层厚度，另一方面可以对加工层面的厚度进行适当的规划。

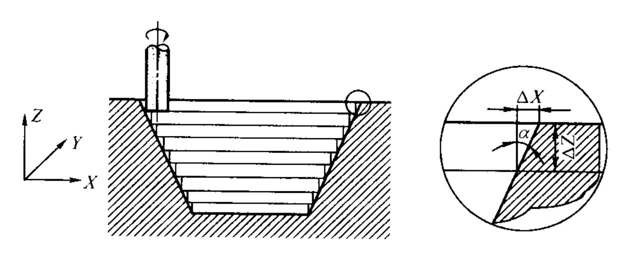


图 2.7-82 型腔的分层去除加工过程

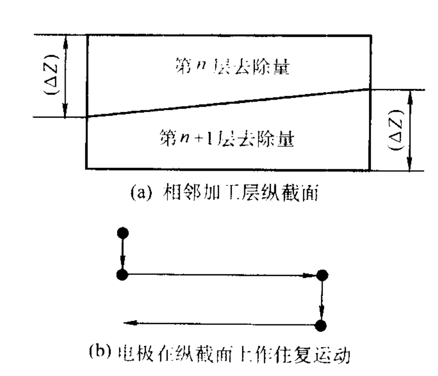
分层厚度 ΔZ 的减小是提高分层加工精度的最为有效和常用的措施，但其所带来的另一直接效果是加工效率的降低。因此在分层电火花加工中，为兼顾加工精度和效率，应在粗、精加工中采用不同的分层厚度。

（2）电极运动轨迹的规划

电极运动轨迹的合理规划是实现分层电火花铣削的关键。

1）纵截面上电极的运动轨迹规划　在基于电极底面放电的电极等损耗分层电火花铣削加工中，如果没有电极损耗的补偿，则随着扫描运动的继续，加工表面将由于电极长度的减小而出现斜度。为减小加工误差，在分层电火花加工中，其相邻两层面的加工应采用往复运动方式，即下一次走刀将沿原路返回。这样可以有效地消除因电极损耗而造成的加工斜度，其原理可用图 2.7-83 示意。

相邻层面间电极的往复运动形式，对于简化程序设计、提高层面的加工精度是十分有利的。但在复杂三维曲面的分层电火花加工中，由于每一层的加工面积均会有所不同，完全的轨迹往复是难以实现的。因此，为提高加工精度，还应在电极往复运动的基础进行电极损耗的在线补偿。



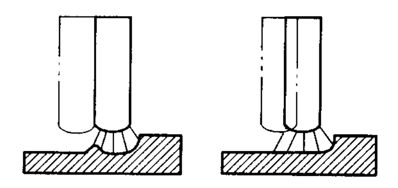
(a) 相邻加工层纵截面

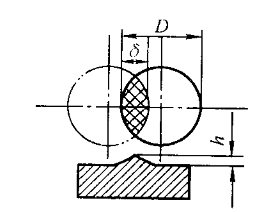
(b) 电极在纵截面上作往复运动

图 2.7-83　分层式电火花加工中相邻两层加工电极往复运动示意图

2）横截面上电极的运动轨迹规划　在每一加工层面上电极运动轨迹的规划原则是：轨迹重叠、长短结合、内外结合、往复运动。

在同一加工层面上，电极运动轨迹的重叠是消除加工痕迹的必然措施。图 2.7-84 示意了用圆柱形电极加工时，运动轨迹重叠对加工精度的影响。由于电极端部的等损耗现象是随电极的扫描运动而逐渐出现的，因此当两次走刀间没有轨迹重叠时，将在加工表面上留下明显的残留高度，如图 2.7-84a 左图所示；随着电极运动轨迹重叠量的逐渐加大，残留高度趋于减小，如图 2.7-84a 右图所示。由于电火花加工中，放电现象总是发生在极间间隙最小处，因此在分层电火花加工中，通过电极运动轨迹的重叠来从理论上消除残留高度是此种加工模式的必要手段之一。

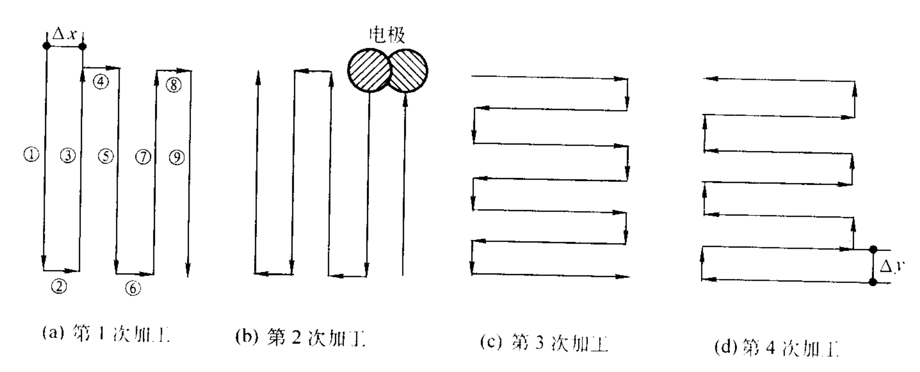

(a) 电极轨迹重叠对加工底面的影响



(b) 电极轨迹重叠对加工轮廓侧壁的影响

图 2.7-84　电极轨迹重叠对加工底面和轮廓侧面加工痕迹的影响

当采用圆柱形电极进行分层电火花铣削加工时，电极运动轨迹的重叠虽可有效地去除加工底面的残留高度，但仍会在加工轮廓侧壁边缘留下明显的加工痕迹，如图 2.7-84b 所示。因此，在规划层面上的电极运动轨迹时，还应采取纵向横向走刀交替、长短结合、损耗互补的方式，如图 2.7-85b、c 所示。实验表明，这种长短结合的轨迹运动方式，可有效地减小轮廓侧壁的残留高度，提高轮廓的加工精度。



(a) 第 1 次加工　(b) 第 2 次加工　(c) 第 3 次加工　(d) 第 4 次加工

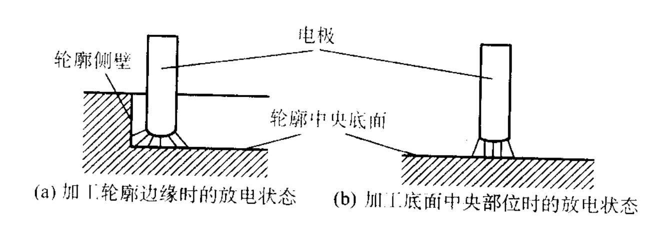
图 2.7-85　相邻层面上的电极运动轨迹

即使采用电极底面放电形式的分层电火花加工时，在加工轮廓的侧壁边缘和中央部分时，电极的放电状态仍会产生很大的区别，如图 2.7-86 所示。可以看出，在加工轮廓的侧壁边缘部位时，轮廓侧壁面的存在使得电极底面的棱边处产生较大的导钝圆角，即使采用旋转的圆柱形电极，这种现象也不能避免。因此为获得高精度的加工表面，充分发挥电极等损耗的作用，层面上的电极运动轨迹还应采用图 2.7-85 所示内外结合的方式。此时电极在加工轮廓边缘时（图 a 中的①、②、④、⑥、⑧、⑨）的电极变钝现象，可在层面中央部位加工时（图 a 中的③、⑤、⑦）予以消除。

综上所述，在基于分层制造原理的电火花铣削加工中，电极运动轨迹的合理规划是提高加工精度的重要措施。其要点为：

1）将放电集中在电极底面，电极侧面不参与放电；

2）加工中，电极只作横向（X、Y）伺服，而不作轴向（Z）伺服；



(a) 加工轮廓边缘时的放电状态　(b) 加工底面中央部位时的放电状态

图 2.7-86　加工轮廓侧壁和中央部位时电极底面的放电状态比较

3）分层厚度小于放电间隙；

4）相邻层面上电极做往复运动；

5）层面加工时，两次相邻走刀间应有轨迹重叠；

6）相邻层面的电极运动轨迹应长短结合；

7）加工轮廓侧壁边缘与底面中央相结合。

可以看出，为完成高精度的三维形面分层电火花铣削加工，电极运动轨迹的规划应以四层（横向来回，纵向来回）为一个循环周期，图 2.7-85 示意了这一过程。

(3) 电极损耗的轴向补偿

电极的轴向补偿进给是保证分层电火花铣削加工精度的重要因素。图 2.7-87 给出了在没有轴向补偿时，一个层面的加工过程的示意图。由于没有电极损耗补偿，显然沿电极运动轨迹展开后，加工底面为一斜面。图中，$\Delta Z'$为工具电极的轴向进给量。很明显，$\Delta Z'$ 应由以下两个部分组成：工件分层厚度 Δz 和电极的轴向损耗量 h_e。

设电极的横截面积为 S_e，层面的加工面积为 S_W，则每一层面的工件蚀除体积为：

$$V_W = S_W(\Delta z + \Delta Z')/2 \tag{2.7-6}$$

此时，电极损耗率可改写为：

$$\theta = \frac{2h_e S_e}{S_W(\Delta z + \Delta Z')} \tag{2.7-7}$$

即：

$$\Delta Z' = \Delta z \frac{2S_e + \theta S_W}{2S_e - \theta S_W} \tag{2.7-8}$$

式中，损耗比 θ 可由实验预先确定，而 S_e、S_W 和每层加工深度 Δz 均为已知值，这样工具电极的轴向进给量 $\Delta Z'$ 即可通过不同层面的加工面积 S_W 方便地求得。事实上，式(2.7-8) 所给出的电极损耗补偿算法只是一种分层补偿过程，即必须在已知某一层面加工面积的条件下，在层面加工完毕后进行下一层面加工时，进行电极损耗的轴向补偿。由于在利用简单形状电极、基于分层制造原理的电火花铣削加工中，电极的横截面积和电极的运动行程均极易得到，因此进行电极损耗的实时补偿是完全有可能的。如图 2.7-87 所示，设某一时刻电极的运动行程为 L_s，电极截面形状为圆形，直径为 D_e。为保持加工深度 Δz 为定值，只需对该时刻的电极损耗长度 h_{el} 进行补偿即可。此时：

$$\theta = \frac{V_e}{V_W} = \frac{h_{el}\pi D^2/4}{DL_s(\Delta Z' + \Delta z)/2} = \frac{\pi D h_{el}}{2L_s(\Delta Z' + \Delta z)} \tag{2.7-9}$$

即

$$h_{el} = \frac{2L_s\theta(\Delta Z' + \Delta z)}{\pi D} \tag{2.7-10}$$

则

$$\Delta Z' = \Delta z \frac{\pi D + 2L_s\theta}{\pi D - 2L_s\theta} \tag{2.7-11}$$

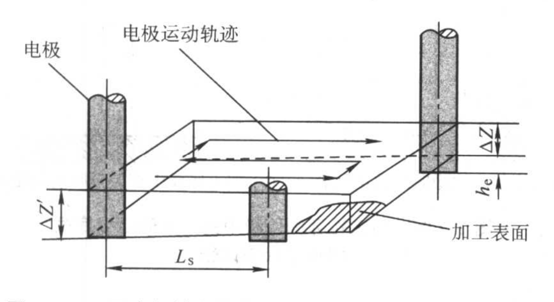


图 2.7-87　无电极轴向补偿时层面电火花加工过程示意示图

由此即可根据任意加工时刻的电极运动行程 L_s 进行电极损耗的实时补偿。式（2.7-11）的缺陷在于，在计算蚀除体积时，没有考虑电极往复运动过程中的电极运动轨迹的重叠。为简化补偿过程，在实际加工中一般只需按式（2.7-8）进行分层补偿即可。

5　微细电火花加工技术

5.1　微细电火花加工的特点与实现条件

众所周知，实现精密、微细加工的一个重要条件是在工件上去除的加工单位尽可能小。而在电火花加工过程中，其加工单位（即每次单个脉冲放电的蚀除量）主要取决于单个放电脉冲的能量。随着现代电力电子技术等的发展，电火花加工的加工精度与表面质量得到了极大的提高，加工单位也日趋变小。目前，精密电火花加工技术已可稳定地得到尺寸精度高于 0.1 μm，表面粗糙度 $R_a < 0.01$ μm 的加工表面。电火花加工已成为零件精微加工的有效手段之一。

微细电火花加工的原理与普通电火花加工并无本质区别。其加工的表面质量主要取决于电蚀凹坑的大小和深度，即单个放电脉冲的能量；而其加工精度则与电极损耗、伺服稳定性等因素密切相关。由于电火花加工是一种非接触式的、宏观加工力很小的加工方式，减轻了工具和工件的力学负担，对于采用微细工具的微细加工而言无疑是极具优势的。相对于微机电系统技术、微细金刚石刀具切削等微细加工技术而言，微细电火花加工技术还具有加工材料的适应性广、三维加工能力强、易于实现大深径比的小孔加工等特点，同时利用其工具与工件间无宏观作用力的特点，可方便地实现斜面上的孔加工及轴向半孔的加工，这对于特殊结构和特殊材料零件的加工是极为有利的。

从理论上分析，只需使用能产生极微能量并且可控性良好的脉冲电源，再配以高分辨率的伺服进给系统和高精度的机床本体即可实现微细电火花加工。但微细电火花加工过程也有其特殊性。为实现微细电火花加工，必须注意以下几点。

1) 放电凹坑与表面粗糙度　由于电火花加工是基于放电瞬时的热抛出过程，因而放电之后在电极表面所形成的放电凹坑，其形状将与放电时的等温面基本相似，其断面几何形状如图 2.7-88 所示。凹坑的两个关键的几何尺寸是放电凹坑直径 D 和放电凹坑深度 H。基于热源模型假设，并经过大量的实验，可得出放电凹坑直径的经验公式：

$$D = 0.151\hat{i}_e^{0.4}t_e^{0.4} \tag{2.7-12}$$

式中，D 为放电凹坑直径，μm；$\hat{i}_e$ 为脉冲电流幅值，A；t_e 为放电持续时间，μs。

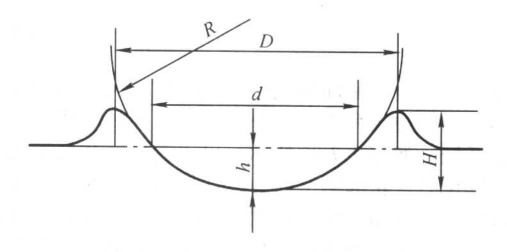


图 2.7-88　电火花加工放电凹坑断面几何形状

上述公式是在以铜为正极加工钢，矩形波脉冲电源加工条件下获得的。由于极间放电维持电压 u 可以认为是常数，所以上面的经验公式可以改写为：

$$D = 0.151\hat{i}_e t_e^{0.4} u^{0.4}(10^{-6})^{0.4}/(10^{-6}u)^{0.4} \approx 11.44W^{0.4} \tag{2.7-13}$$

式中，u 为脉冲放电维持电压，V，一般取 u 为 20 V 左右；W 为脉冲放电能量，J。

如果想完成微细加工，即尺寸精度达到亚微米级，放电凹坑的尺寸也必须达到亚微米级。取 $D = 0.1$ μm，可计算出



单脉冲放电能量 W。

$$W = (10^{-1}/11.44)^{2.5} = 7.14 \times 10^{-6}\,\mathrm{J} \tag{2.7-14}$$

虽然放电凹坑的大小还受到热流密度、放电物理状态和电极材料的热学常数等因素的影响，但是放电能量的参数，对微细电火花加工电源参数的选择无疑是很好的参考价值。

放电凹坑的另一个重要几何形状参数是凹坑的深度 H。大量的实验表明，凹坑的深度 H 与凹坑的平均直径 D 有很大的关系。一般 H/D 约为 0.1～0.2。

电火花加工的表面粗糙度与放电凹坑的深度 H 相关。如果考虑到在重复放电过程中，由于每个脉冲放电的凹坑相互重叠，则其放电凹坑的实际深度一般都小于 H，但大于 H 的 1/3。实际表面粗糙度 R_{max} 还会因为熔融金属的飞溅、粘结和镀覆在电极表面，会比以此计算出的值要粗糙些。

为了达到微细电火花加工的要求，表面粗糙度是一项重要指标。考虑到表面粗糙度、放电凹坑深度与放电凹坑直径的数值关系，应适当选择单发放电脉冲能量的限制条件。

2）微细电火花加工对脉冲电源的要求　电火花加工中，单个脉冲的放电能量主要取决于峰值电流 $\hat{i}_e$ 和放电脉宽 t_e。

由于被加工对象极为微小，且要达到亚微米级的加工精度及表面粗糙度，因此，必须将单个脉冲的放电能量控制在 10^{-6}～10^{-7} J 数量级之间。由于放电过程中，极间电压一般可视为常数，因此可调整的参数只有 $i(t)$ 和脉冲宽度 t_e。为满足微细电火花加工要求，放电电流一般应不小于数百毫安，而 t_e 则应减小到 1 μs 左右。为满足此要求，目前实用的微细电火花加工系统一般均采用 RC 弛张式脉冲电源形式。在此方面的研究中，目前的主要工作集中在如何有效地减小极间杂散电容上，如采用非金属材料床身结构、使用尽可能短的屏蔽电缆等。但 RC 电源存在可控性差、电极损耗较大等缺陷，采用新型高频开关电器元件，研究独立式的窄脉宽电源已势在必行。

3）微细工具电极的制造与安装　要实现微细轴、孔及微三维结构的电火花加工，必须使用极为微细的工具电极。在以往的微细电火花加工中，微细工具电极一般采用专门加工后，二次安装到机床主轴头上的方法，此时明显存在着微细电极的安装误差及变形误差等，难以保证工具电极与工作台面的垂直度以及电极与回转主轴的同轴度等。线电极电火花磨削（WEDG）技术出现以前，微细电极的制造与正确安装一直是制约微细电火花加工技术发展的瓶颈问题。因此为实现微细零部件的精密微细电火花加工，就必须探索有效实用的微细电极在线或在位制造、安装和检测方法。

4）放电面积效应的影响　由于在微细电火花加工中，脉冲放电能量很小，使得放电间隙和放电面积均极小，放电点的分布范围十分有限，其位置在空间与时间上容易集中，增加了放电过程的不稳定因素，降低了火花放电的蚀除率；同时由于工作液循环困难，电蚀产物不易排除，还将造成有效脉冲利用率降低、加工速度变慢；而且由于放电点过分集中于电极的尖角棱边处，将加剧电极在该处的损耗，从而影响加工精度。为使微细电火花加工过程能够正常稳定地进行，有必要对微细电火花加工的蚀除机理、排屑方式、电极损耗及其补偿策略、加工过程的有效控制方式等进行深入地研究与探讨。

5）对电极伺服进给性能的要求　为提高微细电火花加工的加工效率，最为有效的途径是提高脉冲的有效利用率。由于微细电火花加工要求单个脉冲的放电能量很小，放电蚀除凹坑深度在 1 μm 左右。因此，为使火花放电正常进行，伺服进给系统的进给量必须在微米级的范围内。这就要求微细电火花加工的伺服系统和执行机构具有足够高的响应速度和控制灵敏度。

5.2　微细电极的在线制作

用简单形状的微细电极进行微细孔和微三维结构的加工，已经成为当前微细电火花加工的主流技术之一。这是因为复杂形状微小成形电极本身就极难甚至无法制作，而且由于加工过程中严重的电极损耗现象，将使成形电极的形状很快改变而无法进行高精度的微细三维曲面加工。因此，微细电极的精密、高效制作在微细电火花加工中占有极为重要的地位。

采用离线方式进行微细电极制作，并将其二次安装在主轴头上的方法显然很难满足微细电火花加工的要求。这是因为电极的二次安装过程中将不可避免地产生回转精度误差及其与工作台面的垂直度误差。目前常用的电极在线制作方法主要有反拷块加工和线电极电火花磨削（Wire Electrode Discharge Grinding，简称 WEDG）两种方式，如图 2.7-89 所示。

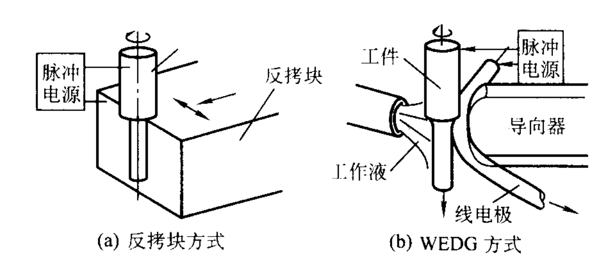


图 2.7-89　微细电极的在线制作

应用反拷块方式在线制作微细电极是一种较为传统的方式，其加工原理是逆向电火花加工。这种方式的最大特点是加工效率较高。但其缺点也是显而易见的，由于反拷块工作面与工作台平面不可避免地存在垂直度误差，加之反拷块工作面本身的平面度误差等，因此其所加工出的微细电极也必将存在加工锥度等误差；而且由于加工中反拷块电极本身的损耗现象，所加工的微细电极的尺寸不易控制；同时由于加工中的放电面积相对较大，很难做到微能放电，这给制作超微细电极带来了极大的困难。

WEDG 的加工原理如图 2.7-89b 所示。加工过程中，线状工具电极沿导向器槽缓慢连续移动，移动速度一般为 5～10 mm/min。金属丝的移动，使加工过程可不考虑工具电极损耗所带来的一系列影响。导向器沿工件的径向作微进给，而工件随主轴旋转的同时作轴向进给。通过控制工件（电极）的旋转与分度及导向器的位置，可以加工出不同形状的电极来。图 2.7-90 为一些可以用这种方法加工出的形状。图 2.7-91 是哈尔滨工业大学应用 WEDG 制作的微细电极。图 2.7-92 是日本东京大学及 Prema 公司制作的部分微细电极。

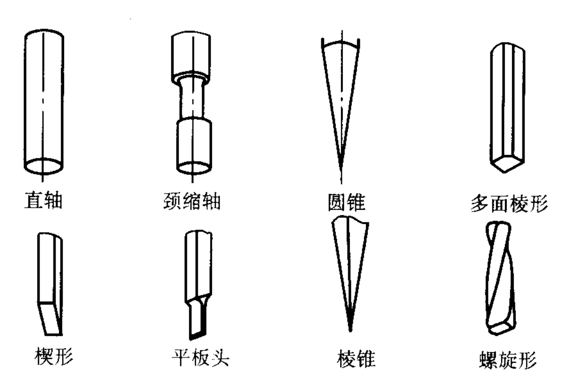
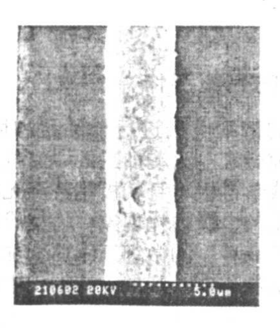
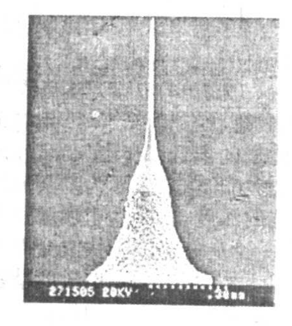


图 2.7-90　可用 WEDG 法加工出的形状



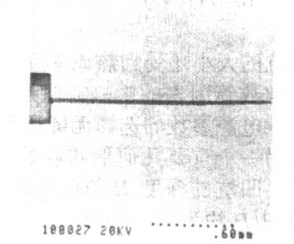
ϕ4.5μm,材料：W

(a)



阶梯轴：ϕ9μm,材料：W

(b)



ϕ18μm,H/D=90,材料：W

(c)

图 2.7-91　WEDG 法加工的微细轴

线电极电火花磨削法具有如下的特点：

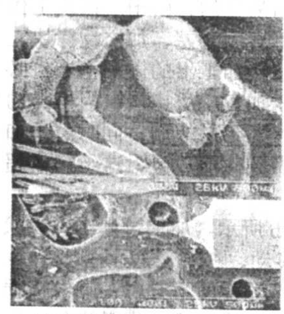
1）是一种在线工具制作方式，可以保证微细工具的几何轴线与主轴的回转轴线始终是重合的，没有偏心和倾斜等二次装配误差。这是线电极电火花磨削法可以实现微细加工的关键所在。

2）因线电极与工件为点接触，故工件的加工形状仅与成形运动轨迹有关，与操作者的技术水平无关，而且极易实现微能放电。

3）由于线电极是连续移动的，因此可以忽略线电极损耗的影响，有利于所制作电极的尺寸控制，提高加工的精度。

4）可以加工多种形状的电极，易于实现自动化。

5）由于加工时是点放电，其加工速度与反拷块法相比较慢。



(a) 直径6mm的微细轴承　　(b) 微细铣刀

图 2.7-92　WEDG 加工的部分工具

为提高微细工具电极的制作精度和效率，可在机床的不同部位上同时安装反拷块及 WEDG 装置，用反拷块进行粗加工、WEDG 装置进行精加工可以充分发挥各自的特点。

5.3　电火花加工装置的微型化

微细电火花加工技术的发展还体现在加工装置的微小型化上。

由于工具电极与工件之间没有宏观作用力，这使得采用电极直接驱动装置实现电火花加工装置的微型化成为可能。并且这种微型装置可以安装在机器人手臂上，从而实现在特殊空间上的加工。20 世纪 90 年代后，日本东京大学的通口俊郎、古谷克司和丰田工业大学的毛利尚武等人利用压电陶瓷的逆压电效应，先后研制出了蠕动式、冲击式和椭圆驱动式三种电极直接驱动的微型电火花加工装置；我国的南京航空航天大学研制出了电磁冲击式、哈尔滨工业大学研制出了蠕动式和超声直接驱动式、清华大学研制出了蠕动式的微型电火花加工装置。

1）蠕动式机构　蠕动式微小型电火花加工机构主要由两个压电陶瓷箝位器（其中一个轴向固定）、一个压电陶瓷驱动器以及电极丝等组成。为保证电极运动平稳性，在两个箝位器与电极之间装有导向机构。通过控制箝位器和驱动器的动作时序和初始状态，即可实现电极的微量进给与回退。图 2.7-93 给出了电极向前进给时的情况，重复以上 4 个节拍即可完成电极的连续蠕动微量送进。如果驱动器的初始状态为伸长状态，则可实现电极的回退。毛利尚武等人利用这种原理开发出的小型电火花加工机构的外形尺寸为 26 mm × 30 mm × 90 mm，电极直径为 ϕ0.1 ~ 0.5 mm，可实现每步 0.7 μm进给。在电火花加工实验中，利用铜电极在 1 mm 厚的钢板上加工出了 ϕ0.1 mm 的孔。图 2.7-94 为哈尔滨工业大学利用这种原理制作的微型电火花加工装置照片。

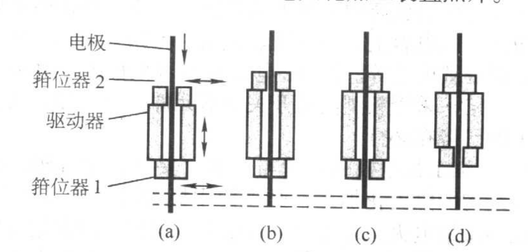
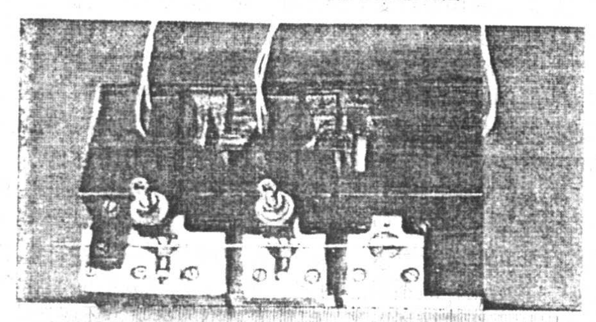


图 2.7-93　蠕动式电极驱动原理图



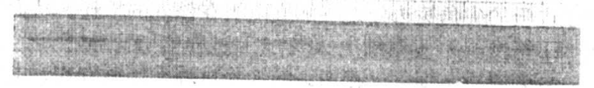


图 2.7-94　蠕动式微型电火花加工装置

2）冲击式机构　冲击式小型电火花加工装置是利用压电振子的轴向快速伸缩运动及重物的冲击惯性来驱动电极运动的，其动作原理如图 2.7-95 所示。古谷克司等人利用上述原理研制的小型电火花加工机构的外形尺寸为 18 mm × 14 mm × 69 mm，可实现每步 0.02 μm 进给。利用该原理，他们还研制出了外形尺寸为 8 mm × 9 mm × 28 mm、可实现每步

0.01 μm进给的横轴式微型电火花加工装置。我国南京航空航天大学利用电磁冲击原理，研制出了电磁冲击式小型电火花加工装置。它可实现每步0.02 μm的进给，加工的最小孔径为ϕ0.085 mm，深径比达4。

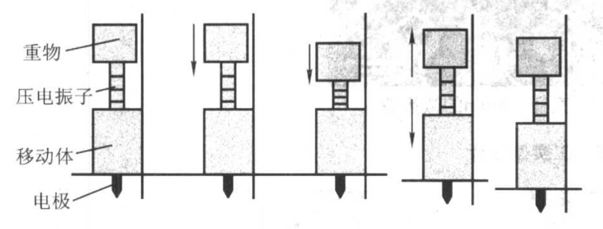


图 2.7-95 冲击式小型电火花加工机构的动作原理

3）椭圆驱动机构 椭圆运动驱动的小型电火花加工机构是利用两组相互垂直排列的叠层压电振子的振动所合成的摩擦驱动块的椭圆运动来驱动电极前进和回退的。古谷克司和毛利尚武等人所研制的椭圆驱动小型电火花加工装置的结构原理如图2.7-96所示。通过控制各压电振子的通电时序和初始相位，即可实现电极的进给或回退。其运动速度可通过调节压电振子的电压来改变。该装置装置外形尺寸为20 mm×60 mm×72 mm，驱动步距为1.2 μm，可在不锈钢板上加工出ϕ1 mm的孔。

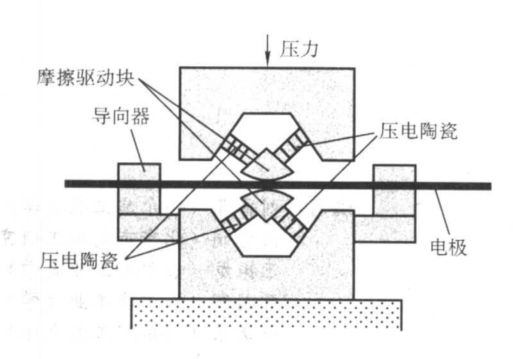


图 2.7-96 椭圆驱动的小型电火花加工机构

4）线性超声电动机驱动机构 利用线性超声电动机直接驱动电极的小型电火花加工装置的原理如图2.7-97所示。图2.7-98为装置的样机及其加工的异型孔照片。该装置主要包括两个线性步进式超声电动机定子、一个移动体、摩擦材料、预紧弹簧、电极等部分。移动体上下表面覆盖有摩擦材料，以增大驱动力并提高步进式超声电动机的使用寿命；预紧力由预紧螺钉通过预紧弹簧加在电动机定子上；电动机定子在其波节处由弹性橡胶固定。电极的进给和回退通过上下两电动机定子的差动实现。哈尔滨工业大学特种加工及机电控制研究所在国家自然科学基金资助下，利用上述原理研制出了40 mm×10 mm ×20 mm的微型电火花加工装置，其电极进给步距可达0.2 μm。

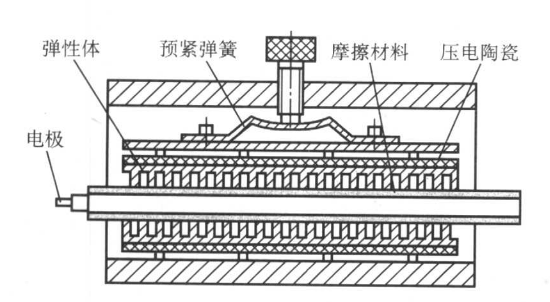


图 2.7-97 超声直接驱动小型电火花加工装置原理

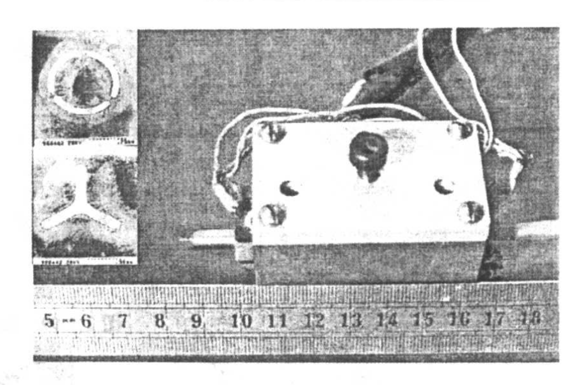


图 2.7-98 线性电动机驱动的微型电火花加工装置及其加工的异型孔

电极直接驱动微型电火花加工装置的出现，有效地降低了进给驱动系统的惯性，对提高电极的响应速度、保证电火花加工的正常进行是十分有利的。

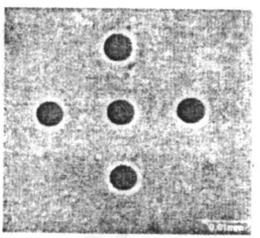
微细电火花加工技术的发展以及微型电火花加工装置的出现已经使得微细电火花加工技术成为微细加工领域的一个重要分支。

5.4 微细电火花加工的应用举例

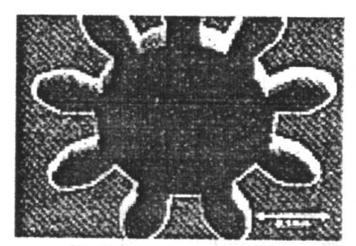
20世纪60年代末，荷兰Philips研究所的Dsenbruggen等人用微细电火花加工技术成功地加工出了直径为30 μm，精度为0.5 μm的微孔。但由于当时条件下尚无法解决微细电极的在线制作问题，使得其加工效率偏低，加工一致性较差，这一成果并未引起人们足够的重视。1984年日本东京大学增泽隆久等人发明了WEDG技术，成功地解决了微细电极的在线制作问题，使微细电火花加工的水平得到了极大的提高。目前微细电火花加工可以加工出ϕ2.5 μm的微细轴和ϕ5 μm的微细孔。在此基础上，应用WEDG技术进行微细工具制作，他们又研究出微细冲压加工，微细管子和微细喷嘴的电火花电铸复合加工法，微细超声加工以及微细钻铣加工等。由于采用微细电火花加工技术成功地完成了微米级微细工具的制作，上述加工方法目前均可进行微米级尺度的加工。利用微细电火花加工技术，1996年，日本三菱电机（株）成功地制作出了由齿顶圆直径为1.2 mm的大齿轮、齿顶圆直径为0.2 mm的小齿轮和直径为0.1 mm的内心轴构成的、最深部的加工尺寸为270 μm的齿轮铸模；1997年，日本松下公司制作出了分度圆直径为ϕ300 μm、齿高50 μm的微型齿轮及5 μm宽、150 μm长的微槽。1999年，日本庆应义塾大学加工出了直径为150 μm、尖端部半径为2.5 μm的扫描探针，并用其完成了三维表面的轮廓测量。

微细电火花加工技术所显示的巨大加工潜力和应用背景也引起了欧美等国的高度重视。美国UNL大学、Optimation公司等开展了大量微细电火花加工的应用研究，加工出微型气动、光学器件，高能激光光圈等，并将其应用到航空航天及医疗等微型机械中。欧洲的比利时鲁文天主教大学机械系运用微细电火花加工方法开展了大量微型机械传感器件、执行器件的加工研究，取得了很多成果。用这种方法加工出的气体薄膜微致动器，可输出的切向力达20 μN，驱动滑块以5 cm/s的速度移动。在硅微细加工方面，微细电火花加工也显示出了良好的潜力，如可在650 μm厚的硅片上加工出30 μm宽的窄线。图2.7-99是日本东京大学和三菱公司用微细电火花加工技术所加工出的部分样件照片。图2.7-100是哈尔滨工业大学加工出的部分微细孔。瑞士Charmilles公司，日本松下电机等公司采用了日本东京大学的WEDG技术，已经研制出了商品化的微细电火花加工机床（见图2.7-101）。



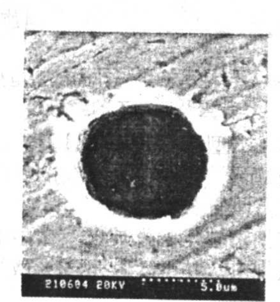


(a) 直径5μm的微细孔

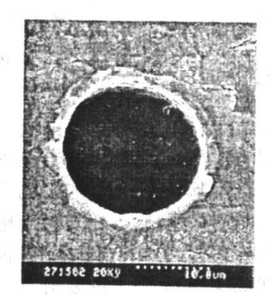


(b) 直径0.5mm的微齿轮

图 2.7-99　微细电火花加工实例照片



(a)直径8μm，不锈钢



(b)直径10μm，不锈钢



(c)深径比为12的ϕ40μm孔

图 2.7-100　微细电火花加工的部分微细孔

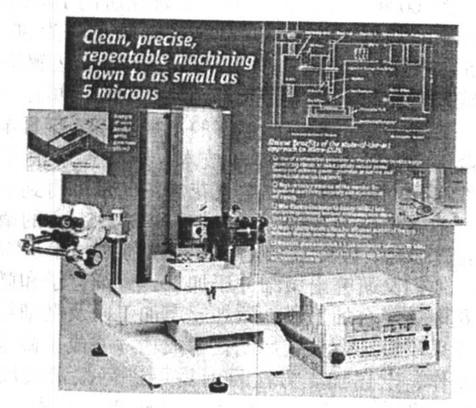


图 2.7-101　商品化的微电火花加工机床

编写：刘晋春（哈尔滨工业大学）
伏金娟（北京市电加工研究所）
王振龙（哈尔滨工业大学）
曹国辉（哈尔滨工业大学）
杨晓东（哈尔滨工业大学）



第 8 章　其他电火花加工技术

1　混粉大面积镜面光整电火花加工

这是 20 世纪末首先由日本丰田工业大学、三菱公司、沙迪克公司等提出、研发的技术。

1.1　大面积电火花镜面加工的探索和难点

为改善加工表面质量，人们提出了镜面电火花加工的概念。所谓镜面一般是指加工表面粗糙度 R_a 值在 0.2 μm 以下的加工表面，此时的电火花加工表面具有镜面反光效果。研究表明，具有镜面加工效果的电火花加工表面，其表面“白层”厚度均匀、极少有微裂纹，并且具有较高的耐磨性和耐蚀性。因此镜面电火花加工表面具有较高的表面质量，加工表面无需抛光即可用作零件的最终表面，具有重要的实际意义。

早期的镜面电火花加工技术研究均基于这样的思想，即降低单个脉冲电火花放电能量，使电火花放电产生小的放电蚀坑，从而产生表面粗糙度值低的加工表面。如日本的 Sodick 公司在 20 世纪 80 年代初推出了窄脉宽、低峰值电流的 PIKA 电源，使加工表面粗糙度 R_a 值达到小于 0.1 μm 的水平。瑞士 CHARMILLES 公司开发出纳秒级 SPS 脉冲电源，最佳加工表面粗糙度 R_a 可达 0.05 μm。但这时的镜面加工仅限于小面积加工。随着加工面积的增大，电极和工件在绝缘体煤油间的寄生电容相应增大，寄生电容对放电脉冲的储能作用增强，当单个小能量放电脉冲作用于电极和工件间时，并不能引起电极和工件间的火花放电，此时的脉冲能量被储存于寄生电容中，只有当多个放电脉冲到来，寄生电容中储存了足够多的能量后，才引起火花放电，但此时的放电能量相当于多个放电脉冲能量的和，放电能量增加，产生的放电蚀坑深度增加，加工表面粗糙度值增大，加工表面失去镜面效果。

实际电火花加工中，其加工面积往往较大，因此研究大面积下的镜面电火花加工技术更具有实际意义。为实现大面积下的镜面电火花加工，日本丰田工业大学的毛利尚武、斋藤长男等人针对极间寄生电容对加工表面粗糙度的影响，提出了“分割电极法”，即将较大面积的电极分割成许多个相互绝缘的小电极，每个小电极都有独立的脉冲电源供电，这样每个小电极的寄生电容都很小，在小能量脉冲电源的作用下，能够实现小面积的镜面加工，相邻小电极间绝缘部分的加工，通过电极的平动加工完成。该加工方法的实验室效果是好的，但实际应用中存在着电极制造、电极连线及加工控制等诸多困难，难以在实际生产中应用。

为克服电极连线等困难，毛利尚武等人又提出了用硅等高阻抗材料作电极的设想，由于硅为半导体，对电荷流动有较高的阻碍作用，当电极表面上某点发生放电击穿时，其他部位处的电荷不能够迅速流过来参与放电，使火花放电时的电流减小，从而达到减小放电能量，降低加工表面粗糙度值的目的。按照这一思路，毛利尚武等人成功地于 1985 年加工出了面积达 $275cm^2$ 的镜面。尽管硅电极能够降低加工表面粗糙度值，但硅材料的强度低、脆性大，复杂形状的硅电极制作困难，而且加工中硅电极的损耗较大，因此用硅电极进行实际大面积镜面电火花加工同样有许多困难。但通过该实验，毛利尚武等人发现当工作液中混入大量硅粉末时，用普通纯铜或石墨电极也能够进行大面积镜面加工，进一步研究还发现，用导电的金属粉末（如铝粉、铬粉、钛粉等）也能起到同样的加工效果。由于该方法只是在工作液中添加一定量的硅、铝等粉末，对电极、机床无其他特殊要求，便于实际应用，因此该方法一问世就受到电加工界的广泛重视。

1.2　混粉电火花镜面加工的原理和机理

研究表明，混粉大面积电火花加工可以达到镜面的原因主要有以下几点。

1）混入粉末后的放电间隙增大，寄生电容减小。工作液煤油中混入微细导电粉末之后，工作液的电阻率降低，在同一脉冲电源峰值电压下的击穿间隙、放电间隙成倍增大，寄生在工具电极与工件、工作台之间的电容（潜布电容）成倍减小，使得用较小的单个脉冲能量可以加工出较小的放电凹坑。

图 2.8-1a 为混粉电火花加工放电间隙增大的示意图。导电性粉末进入放电间隙后，相当于在间隙液体中悬浮有许多小导体。假定平均直径为 d 的粉末为大小相同的球形并保持规则排列，则原火花放电间隙 g 增大为

$$H = md + g$$

式中，m 为混粉电火花加工时放电间隙直线距离上粉末颗粒的个数。

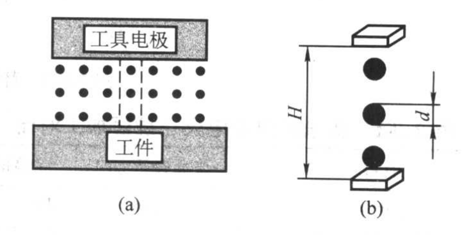


图 2.8-1　混粉电火花加工放电间隙示意图

据报道铝粉末工作液能使放电间隙比普通不混粉时增大 10 倍以上（与铝粉浓度有关）。

2）粉末间的“串联放电”使单个脉冲放电落到工件表面的能量成比例减小成若干（m）分之一，如图 2.8-2 所示，可以加工出更小、更浅的火花凹坑，更低的表面粗糙度值。

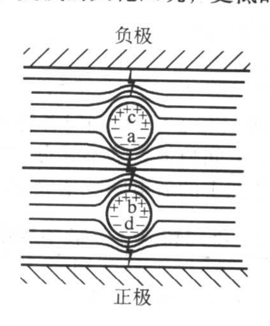


图 2.8-2　“串联放电”示意图

3）混粉工作液使放电通道变粗。混粉电火花加工是精加工，常采用小规准（小电流、窄脉宽）、正极性（工件接正极）加工。由于带正电的离子质量大，在同样电场力作用下，其加速度与电子相比小很多，短时间内运动速度增加较小，因此在窄脉宽放电加工中，放电通道中的载流子主要为电子。放电时电子首先从工具电极（负极）表面逸出并在电场力的作用下加速向工件表面（正极）运动，运动中不断和工作液中的极性分子及粉末微粒碰撞，使它们获得能量并释放出更多的电子，致使放电通道中的电子数目呈“雪崩”式



增加，放电通道逐渐变粗，形成“喇叭”形通道。放电间隙越大，电子运动路径越长，碰撞出的电子数愈多，放电通道的喇叭口越大，工件表面的放电斑直径越粗，如图2.8-3a所示。使工件表面放电点能量密度变小，放电凹坑小而浅，表面粗糙度值小。反之如图2.8-3b所示则电蚀坑小而深。

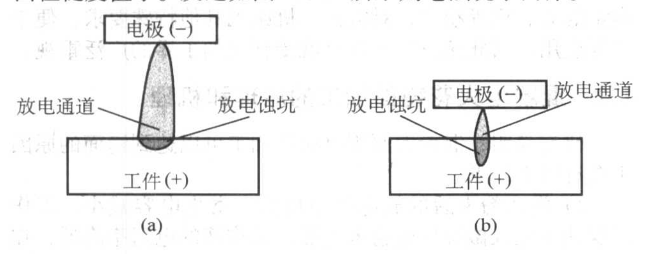


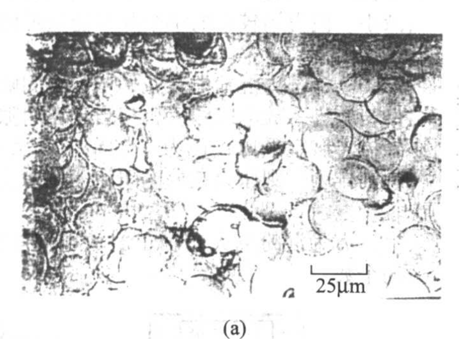
图2.8-3　放电蚀坑形状对比

4）放电点分布均匀、细化，放电概率提高。图2.8-4a、b为400倍显微镜下的混粉电火花镜面加工和普通电火花加工表面的微观形貌照片。图中可见前者放电坑小而浅，分布均匀，反光效果好；而后者则大而深，形状不规则，还有放电集中、短路等不良痕迹存在。火花放电的脉冲率很低，因此生产效率也很低。

表2.8-1记录了在加工表面粗糙度值相近的情况下，在普通电火花加工工作液中，用小规准电参数加工小面积镜面时，其加工效率非常低；相反，混粉电火花镜面加工效率高，以单位面积计，混粉电火花镜面加工的效率约为普通电火花镜面加工的14倍。

1.3　混粉大面积电火花镜面加工试验研究

1）不同粉末种类的放电间隙值　表2.8-2所示为粒度



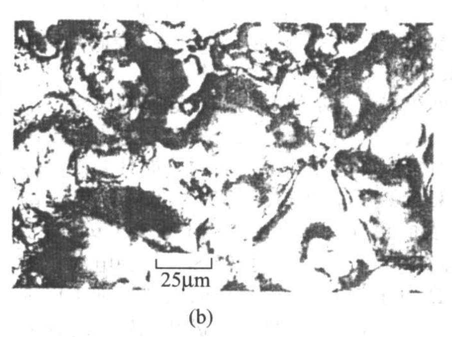


图2.8-4　普通和混粉电火花加工表面微观形貌

表2.8-1　普通和混粉电火花镜面加工对比

项目	普通镜面加工	混镜面加工
工作液	煤油	煤油+铝粉
加工面积/mm^2	113	10000
峰值电流/A	1.76	3+3.5（高压）
脉冲宽度/μs	2	2
加工表面粗糙度 R_a/μm	0.1	0.107
加工时间/h	4	25
加工单位面积所需时间/$min \cdot cm^{-2}$	212	15

（1~10μm）和浓度（40g/L）相同时各种不同粉末混粉电火花加工时的平均放电间隙值，除不导电的玻璃粉外，其他粉末都比普通电火花加工的放电间隙增大2~12倍。

表2.8-2　不同粉末工作液中放电间隙值

工作液条件	无粉末	石墨粉	Si粉	Al粉	碎玻璃粉	碳化硅粉	硫化钼粉
放电间隙/μm	10~15	45~50	27~33	120~160	10~15	80~90	44~48

2）不同粉末浓度的放电间隙值　图2.8-5所示为用不同浓度Ni粉混粉加工的放电间隙变化。用Si、Al等粉末也有类似结果。

3）加工面积对表面粗糙度值的影响　图2.8-6表明普通电火花加工和混粉电火花加工时，加工面积和最佳表面粗糙度之间的关系曲线。曲线表明，普通电火花加工由于寄生电容等影响，面积稍大，表面粗糙度值急剧上升；而混粉加工则对面积大小不太敏感，可以加工出较大面积的光整镜面。

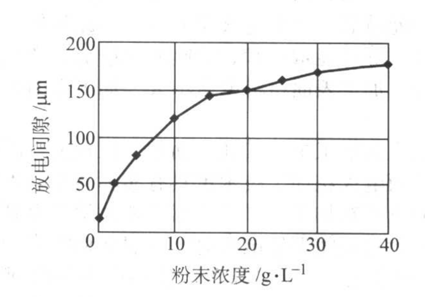


图2.8-5　放电间隙变化曲线

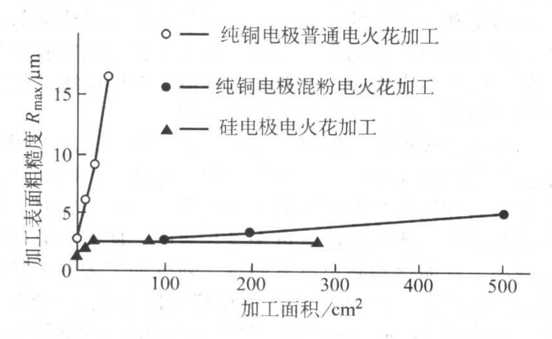


图2.8-6　加工表面粗糙度随加工面积变化曲线

1.4　新型混粉电火花镜面加工装置的研制

图2.8-7为现有混粉装置的电火花加工系统，其缺点是：

1）用了两个储液箱，混粉电火花加工前、后需要切换，切换前后的准备、擦洗工作量大而脏，非常不便；



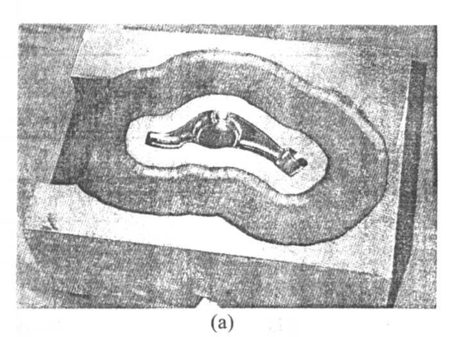
混粉工作液储液箱

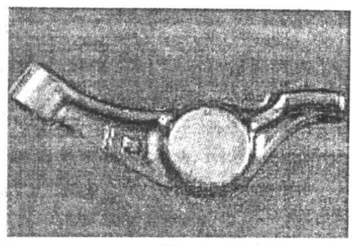
换向阀

普通工作液储液箱

续表 2.8-3

粉末	Al
粉末粒度	≤10 μm


(a)


(b)

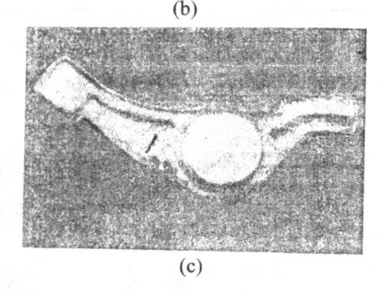

(c)

图 2.8-11　混粉电火花镜面加工的模具

2　电火花磨削加工

作为磨削，一般工具电极和工件都应各自作回转运动，或工具电极和工件有相对的回转运动。利用普通外圆、内圆、平面磨床，只要加上"电刷"等导电机构，原则上可以改装成电火花磨削机床。只是原来机床的砂轮应改用石墨、紫铜、黄铜等导电材料作成工具电极。此外，原来的进给运动、吃刀（上刀）运动也应改为伺服进给运动或者改为间歇的机动或手动进给，而不能采用等速的机动进给，否则工具电极和工件之间易产生短路甚至损坏机床设备。

电火花磨削加工时，工具电极与工件间并不接触，且放电爆炸力很小，不易引起工件及工具电极的变形。因此，适用于各类低刚度零件，诸如细长杆、薄壁环形工件、蜂窝结构件以及高硬度、高黏度的高温合金等常规机械磨削难以加工的平面、窄槽、型孔等加工。

为了进行电火花磨削，工具电极与工件应有相对旋转运动。其加工示意图如图 2.8-12 所示。

可见电火花磨削与机械磨削相似，只是将机械磨削用的砂轮改用石墨或铜等导电、耐火花腐蚀材料制成工具电极，即可实现电火花磨削加工。

常见的电火花磨削方式如图 2.8-13～图 2.8-17 所示。

1）周边磨削　如电火花外圆磨削（图 2.8-13），内圆磨削（图 2.8-14）及轮缘平面磨削等。

2）端面磨削　如立轴平面磨削（图 2.8-15），双端面磨削（图 2.8-16）。

3）成形磨削　如齿轮磨削（图 2.8-17），花键磨削，螺纹磨削等。

电火花磨削的工艺特点：

1）机械作用力很小，特别适合于薄壁弱刚性零件的磨削加工；

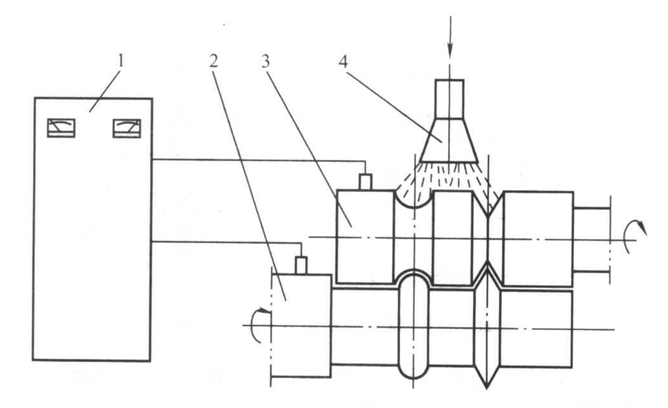


图 2.8-12　电火花磨削加工示意图

1—脉冲电源；2—工件；3—工具电极；4—工作液喷头

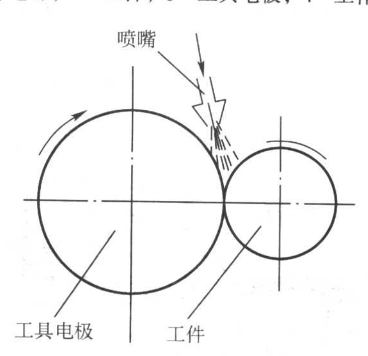


图 2.8-13　电火花外圆磨削

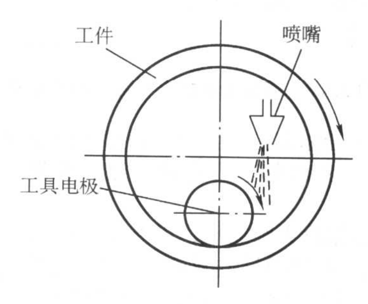


图 2.8-14　内圆磨削

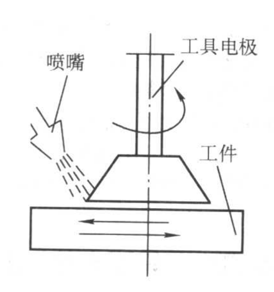


图 2.8-15　立轴平面磨削

2）通过控制脉冲电源的电参数，能获得较高的加工尺寸精度及良好的表面粗糙度；

3）加工范围广，如内、外圆，平面，螺纹、花键、齿轮等成形面，各类成形刀具等；

4）对小批量试制工作，可由毛坯直接磨削成形；

5）工件及工具电极的转速较机械磨削低很多（约 0.2～0.5 m/s）；

6）工具电极与工件间放电面积在多数情况下比较小（尤其是采用周边磨削方式时），故电火花磨削加工效率低于常规电火花加工效率。



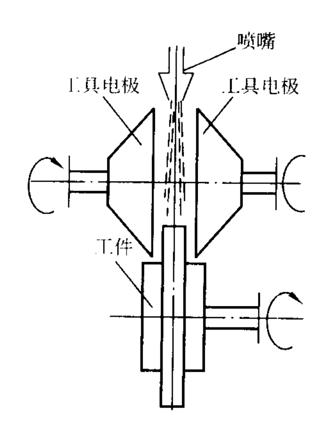


图 2.8-16　双端面磨削

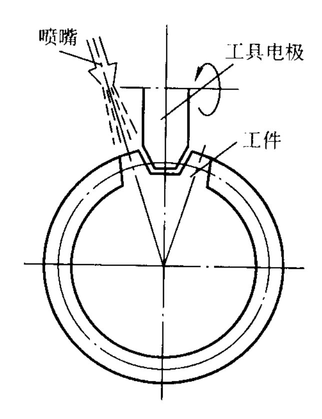


图 2.8-17　齿轮磨削

在实用中采用什么磨削方式，要根据工件加工部位的形状及结构、刚性等因素综合考虑确定。

2.1　薄壁低刚度工件（蜂窝结构）的电火花磨削

航空发动机广泛使用的密封件——蜂窝结构环是典型的薄壁低刚度工件。正六边形蜂窝的壁厚只有 0.05 ~ 0.06 mm，自身刚度极差，其材质多为耐热合金。采用常规机械加工（车削或磨削）时，在切削力作用下，大部分材料无法自基体切除而倒向一边，将蜂窝孔堵塞，不能满足使用要求。而电火花磨削时，电极与工件间作用力很小，不致引起低刚度工件的机械变形，而且蜂窝结构类型工件的蚀除余量很小，采用电火花磨削的加工效率还是较高的。实践证明，采用电火花磨削加工工艺，对蜂窝结构的成形效果很好，其加工效率高于机械磨削。

图 2.8-18 为航空发动机压气机机匣蜂窝密封环结构示意图。压气机有三层叶片，机匣对应部位钎焊有三级蜂窝密封环，蜂窝环单边的加工余量约为 2 ~ 5 mm。

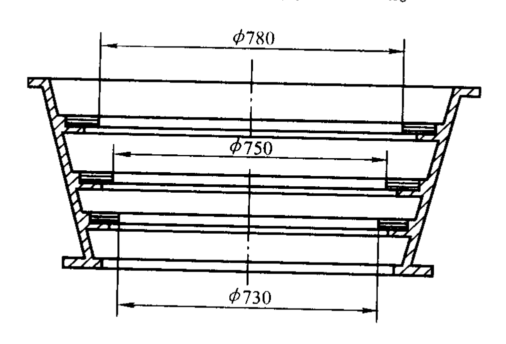


图 2.8-18　蜂窝密封环结构示意图

（1）工具电极制备

为了提高加工速度，增加同时加工放电面积，工具电极包角 θ 通常大于 30°。见图 2.8-19。

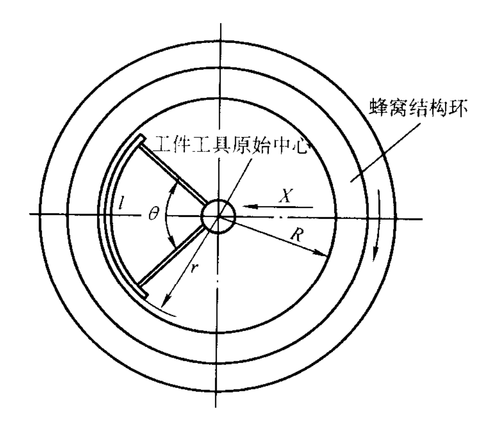


图 2.8-19　蜂窝结构环加工示意图

（2）工作液供给方式

为了防止加工时喷溅的油雾被电火花引燃，通常不采用向放电部位喷液的供液方式，而是采用浸没式加工，放电部位浸没深度不得少于 50 mm，以防引起火灾。

（3）粗加工（图 2.8-19）

由于蜂窝密封环是由一块块蜂窝块钎焊而成，各块在径向的位置相差较多，加工余量大多为 2 ~ 5 mm（单边）。为了提高加工速度，粗加工时常采用分段加工法，即根据工具电极的弧长 l（或夹角 θ），分为 $2\pi r/l$（或 $360°/\theta$）段，每段相邻处重合 2 ~ 5 mm，防止接缝处产生飞边，影响精加工的顺利进行。每段均进给至同一坐标处（X_c）。由于加工蚀除的金属体积很小，所以电极的损耗可忽略不计。X_c 根据最终尺寸的 X 轴坐标 X_z 及精加工余量 Δ_j 确定：

$$X_c = X_z - \Delta_j$$

（4）精加工

精加工前，应先清除工具电极上的炭屑等附着物，再缓慢地使工具电极与工件表面接触，记下 X 轴的坐标值 X_1，然后在工件圆环内均匀地测 5 ~ 6 点，分别记下接触点的 X_1，依最小的 X 坐标值确定精加工的起始进给位置。各点的 X 坐标值通常相差 0.04 ~ 0.06 mm，这个差值主要是因工具电极的圆弧半径 r 与工件半径 R 不同而产生，其次，工具电极损耗也是差值产生的原因之一。精加工余量的大小，主要由以下几个因素综合考虑后确定：

1）加工部位的尺寸精度公差及表面粗糙度要求；
2）加工部位的形状公差要求；
3）工具电极圆弧半径 r 与工件半径 R 差值以及两者圆心 Y 坐标差值的大小；
4）分段加工段数的多少；
5）操作者技术的熟练程度及设备加工稳定性。

如果工件的尺寸精度及加工表面粗糙度要求高，则加工余量应适当加大，通常单侧余量不宜不少于 0.20 mm；若要求不高（如公差大于 0.10 mm、$R_a \geqslant 6.3\ \mu m$），为提高加工效率，精加工余量为 0.10 mm 即可。

当加工部位的形状公差要求较高（如圆度 ≤ 0.03 ~ 0.04 mm）时，应增加精加工余量 0.05 ~ 0.10 mm，以免超差；要求不高时此项可不予以考虑。

若工具电极圆弧半径 r 比 R 小 25 mm 以上时，粗加工后的工件类似多棱圆，故精加工时应放大加工余量 0.10 ~ 0.15 mm；如 r 与 R 之差 ≤ 5 ~ 10 mm，则可不考虑这一因素。

分段加工的段数愈少，精加工的余量就愈大，当分段数

超过12时，即不考虑增加的加工余量。

操作技术越熟练，加工稳定性高时，精加工余量就取偏小值；相反时，则应选大的加工余量，以免工件加工时超差。

(5) 尺寸测量

由于蜂窝密封环的圆周面是由一个个正六角形构成的，其内接圆直径多为0.5～1.0 mm，当使用内径千分尺或内径差测量时，测头的球面会落入蜂窝中，导致测量的尺寸数值大于工件实际内径值（参见图2.8-20）。对这个测量误差要予以重视。例如当 $d=0.5\sim1.0$ mm时，Δ 值为0.015 7～0.063 5 mm。通常可根据经验数值予以修正，当 $d=0.4\sim0.8$ mm时，一般为0.01～0.04 mm（蜂窝大时取大值）。当 $d\leqslant0.05$ 时，Δ 值可略去不计。也可将测头的钢球加大（换成直径6 mm或8 mm的钢球），以减少测量时的误差。

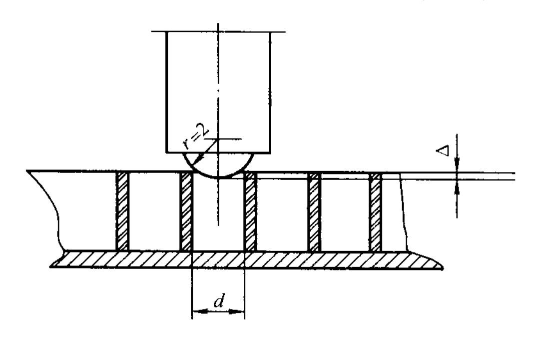


图2.8-20 测量误差示意图

(6) 应注意的工艺问题

1）当采用电火花磨削加工时，有些操作者常感到加工尺寸难控制。工具电极进给到 X 轴某个位置时，测量工件孔径总与预计值不符，有时偏大，有时又偏小，似乎没有什么规律性。

出现这一现象主要是操作者工艺经验不足，进给不均匀，时大时小；工作液过滤欠佳，加工部位蚀除物浓度大，将导致二次放电概率加大，使得孔径尺寸变大；电极表面积炭层未及时清除，也易使工件实际尺寸加大。而当进给量过多，未充分放电加工时即退刀，则孔径尺寸将小于预计值。当电极进给到某一位置后，假如此时工件的圆度较大，加工时间短，各部位放电概率相差较多，此时停机测量，孔径大多偏小；若工作液较混浊，又不及时进给，则因放电部位频繁发生二次放电导致孔径尺寸加大。特别是当放电脉宽较大时，影响更加明显。因此在精加工前，一定要清理工件及工具电极表面，清除电蚀屑及电极表面的沉积物。

2）粗加工结束时，应使工件的圆度误差小于图样要求，方能保证精加工的顺利进行。精加工阶段，应当频繁进给，每次进给量不应超过0.02 mm，防止各部分放电不均匀而导致圆度误差加大。

3）工具电极片的厚度不宜小于5 mm。工具电极过薄，刚度低，在加工过程中偶然与工件发生碰撞（在粗加工时是难免的），或电火花放电部位局部升温，均将导致电极变形而直接影响正常加工。

4）由于电火花磨削蜂窝密封环时，工具电极在 Z 向是固定的，工具电极的侧面母线若倾斜，将直接影响到工件的内孔尺寸（出现“大小头”现象），参见图2.8-21。加工前用工具电极下端面触及蜂窝环上表面，坐标清零后，X 向退刀，Z 轴下降高度应超过密封环工作高度1.5～2 mm，防止密封环出现“台阶”。

5）对于有多层蜂窝密封环的工件（如图2.8-18所示），加工时宜采取自下而上的加工方式。一来加工蚀除物不致大量沉积到未加工蜂窝内，避免了加工不稳定（易产生电弧

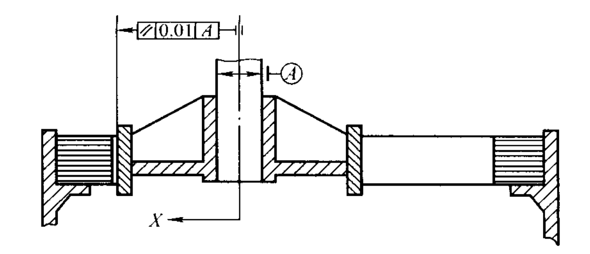


图2.8-21 工具电极侧面与工件轴心线相对位置示意图

灼伤）；二来对刀时稍有不慎，不会碰伤已加工表面。第一个环（下环）加工完成后，工具电极在 X 向的坐标已知，中环及上环粗加工时的进刀终止位置可根据图纸尺寸推算，不必进行工序间尺寸检测，可节省辅助工时。

6）对于非钎焊固定的蜂窝件进行电火花磨削时，每块蜂窝构件与工件基体的接触一定要良好，防止接触不良而引起放电不稳定，甚至无法顺利磨削。必要时，可用铜片将各蜂窝块塞紧，但所塞铜片不得超过预定加工孔径表面，以防止加工蜂窝时一并磨削。因铜片蚀除体积大而导致此部位出“凸包”，还易出现电弧，烧伤工件。对于钎焊的蜂窝件，加工前务必将残存在蜂窝内的焊料等杂质去除，防止加工时造成短路，烧伤工件。

2.2 成形表面的电火花磨削

常用于电火花磨削（铲磨）硬质合金小模数齿轮滚刀、硬质合金搓丝板等零件。

在成形表面的电火花磨削时，应注意下列几点。

1）磨削工作液应选用闪点高的电火花工作液，确保磨削时采用浸没式或充分喷淋加工均无发生火灾的危险。

2）磨削方式究竟是采用圆周磨削（纵磨或切入磨）还是端面磨削，要根据工件成形表面的形状特点综合考虑进行选择。

3）工具电极材料选用石墨、纯铜或黄铜，还是其他导电材料，既要考虑成形表面的精度要求，还要考虑工具电极制作的难易及生产成本。

4）工具电极的结构与制作，是关系成形表面加工成败的关键，必须认真研究解决。

例如为了实现精密成形电火花磨削工艺，加工过程中需使用多个电极更换进行加工，因此对电极安装部位应重点考虑：既要便于及时更换，又要求重复定位精确；又因为电火花磨削精加工时间很长，电极夹柄应尽可能通过电极的重心轴线，这样才能有效地防止长时间加工时电极的变形或移位。

5）加工参数（包括机械参数及电气参数）要认真选择。

航空发动机中有很多内圆表面的零件，也需采用电火花磨削，此类零件电火花磨削加工中的要点如下。

1）航空发动机零件的待加工部位，大多为旋转成形的圆弧面，且沿圆周各部位加工余量不均匀，有时相差很大。旋转加工时，只在局部余量大处放电，其余部位均为等待时间，加工效率难于提高。而且，稍有不慎，电极与工件会发生刚性碰撞，造成短路烧伤或使工件移位。因此，要求加工所用脉冲电源有较强的抗短路过载能力及灵敏的伺服进给加工功能。当零件待加工面圆度相差较多时，若采用径向伺服进给加工，则整个圆周几乎都处于放电磨削状态，表面上看，余量蚀除较快，但这种加工方式无法消除零件原有的不圆度误差，整个磨削过程近似“仿型加工”，以致零件已加工到尺寸，没有加工余量时，仍未达到图样的形状精度要求，导致工件报废。为了达到修圆的目的，须将伺服的“跟踪仿形”加工方式改为“车削”加工方式，即对零件加工部



位的高点采取分段进给，逐步予以去除，使加工表面逐渐接近理想圆周面。

2）为了满足不同部位的加工要求，加工用工具电极的制作与安装方式也很重要。电火花磨削设备大多是主轴头沿垂直方向（$\pm Z$ 向）或沿水平方向（$\pm X$ 向）正反向伺服进给，工件做旋转运动实现加工的。针对这两轴进给的特点，设计制作工具电极时，只要求确保工具电极 Z 向侧母线与 Z 轴保持平行，不得倾斜（加工锥面时另当别论），而对其余方向则要求不高。若工件的某些底面需要加工，则要求工具电极底面与 Z 轴垂直且与 X 轴平行。为了提高加工速度，它们的圆周方向长度应尽可能长些，以增加工件同时放电面积。工具电极的安装柄应尽可能通过电极的重心轴线，长时间放电加工时以免因电极的重心轴线和电极变形移位导致尺寸精度或形位精度超差的危险。同时，为了便于工具电极的找正与更换，在设计电极时，应对相关基准部位给予足够的重视。

3）加工余量的分配　在粗加工已基本修圆（圆度≤0.02 mm、$R_a \leqslant 10$ μm）情况下，最小精加工余量可参照2.8-4选取。

表 2.8-4　最小精加工余量

表面精糙度要求 R_a/μm	6.3～3.2	1.6～0.8	0.4～0.2	0.2～0.1
最小精加工余量 /mm	0.1～0.2	0.05～0.1	0.02～0.05	0.01～0.03

合理地进行加工余量分配是十分重要的。为了缩短零件总的加工时间，应将零件加工余量的大部分采用粗加工予以去除，但粗加工电参数的选择，应确保粗加工时零件表面产生的裂纹等缺陷，在中加工时能予去除。否则，单纯追求加工速度，粗加工产生的裂纹过深，精加工时无法完全去除，将导致工件报废。由于工件材质各不相同，正式加工前，应进行必要的工艺试验，找出该材质在不同脉宽及电流幅值时的表面质量关系曲线，供加工时参照选择适宜的电参数。加工余量的分配主要依据粗、中、精加工的表面质量状态确定。先根据零件加工表面粗糙度要求，参照表2.8-4选择精加工余量，中规准加工余量约为精加工余量的1～4倍，工件最终要求的 R_a 值愈小，中规准余量倍数选得愈大。加工总余量扣除中、精加工余量后，即为粗加工余量。在实际生产中，有些工件因总加工余量较小，除去中、精加工余量后，已没有粗加工余量了。此时，只能采用中规准进行加工，方能保证工件的最终尺寸与形状精度要求。

通常粗加工完成后，工件应基本修圆（已加工表面超过90%），中规准加工的目的在于中加工时要求完全去除表面细微裂纹等缺陷，提高加工表面质量。

4）加工参数选择　电火花磨削时，电极损耗的影响远比电火花成形加工时小，因此，选择电参数时，主要从加工速度及加工表面质量要求考虑。要防止电火花加工表面层裂纹的产生。材料导热性差的，裂纹倾向严重；放电能量大，裂纹倾向相应加大；在相同电压及电流幅值时，随脉冲宽度的增大，裂纹深度增大；电极材料对工件裂纹的产生也有一定影响，在其他参数相同的情况下，采用铜钨合金电极加工，工件表层裂纹相对较少。

试件加工状况统计表明：当脉宽≤64 μs时，加工表面产生的裂纹深度小于0.01 mm，裂纹长度约0.1～0.4 mm；当脉宽≥256 μs时，裂纹深度达0.06～0.10 mm，裂纹长度达0.6～1.5 mm，个别裂纹长达4 mm以上，且裂纹密度明显增加。为确保工件表面加工质量，粗加工时选用的脉宽应小于256 μs。为了提高磨削效率，可适当加大电流幅值（不宜过大，电流密度应控制在3～5 A/cm² 左右）。

2.3　窄槽类零件电火花加工工艺

要实现图2.8-22所示流线形通孔窄槽的加工，关键是解决工具电极的制作与装夹定位问题。

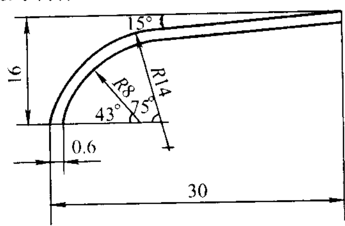


图 2.8-22　机匣流线形槽尺寸图

1）由于工件加工表面粗糙度要求不高（$R_a = 3.2$ μm），兼顾生产率要求，采用中规准加工即可满足工艺要求。经试验，脉宽64 μs时，单边放电间隙值为0.06～0.08 mm，取平均值作为计算电极尺寸依据，则电极厚度的名义尺寸为：

$$0.60 - 2 \times 0.07 = 0.46 \text{ mm}$$

由于快速走丝时的抖动及材料的变形，切出的电极无法达到加工要求，且工件槽孔很多，需使用近百片电极，故最后选定用模具压制成形工艺制造电极，这就要求准确确定工具电极的各部分尺寸后再采取模拟放电试验法。由图2.8-23可知，电极损耗主要取决于低压放电峰值电流的大小，同时与脉宽也有一定关系。

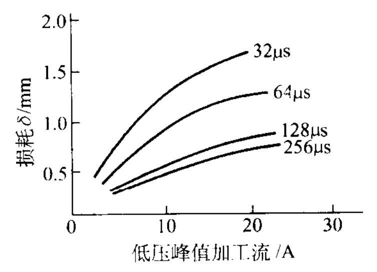


图 2.8-23　电极损耗与低压放电峰值电流的关系

最后，选定脉冲宽度为64 μs；低压峰值电流12 A作为正式加工用参数。这时的单边放电间隙为0.06～0.08 mm。由图2.8-23可知，电极损耗为1.0 mm时损耗率约为20%。若欲用每片电极加工12个槽孔，则电极损耗量为12 mm，由于尖角部分损耗大，要多穿透一些才能将槽形修正（试件加工时，至少穿透10 mm才可修正槽形）。为了提高加工效率，当尖角损耗过大（超过5～8 mm）时，应将损耗部分用线切割切除。为防止工件与电极发生碰撞，要留出10～15 mm的安全距离，因此电极的工作长度至少应为12 + 5 + 10 + 8 + 15 = 50 mm。电极的夹持部分长40 mm，最终确定电极长度为100 mm。电极片的厚度选0.45～0.46 mm，设计、制作电极片压弯模具时，应注意电极压弯时两侧面有应力应变。出模后电极片会回弹，应对模具形状作相应的修正。

图2.8-24为机匣流线型槽加工示意图。应依夹具旋转中心找正工件，使其与工件轴心相重合（重合精度误差应 < 0.02 mm），避免两轴心不重合造成分度误差。找正后将工件夹固（注意夹紧力无需太大，以免工件变形）。

2）找正电极夹具（a、b 两个方向）使其固定电极的长度方向与进给方向（X 向）保持平行，夹具上表面与 Y 向平行且与 Z 轴垂直。

由于工具电极自身刚度差，安装时要轻拿轻放，不得用力捏两侧边或磕碰。电极片夹紧后，在 a、b 向复核电极母线是否与X向平行，误差应小于槽形误差的1/3。

3）由于制作电极时，单边放电间隙按0.07 mm考虑，

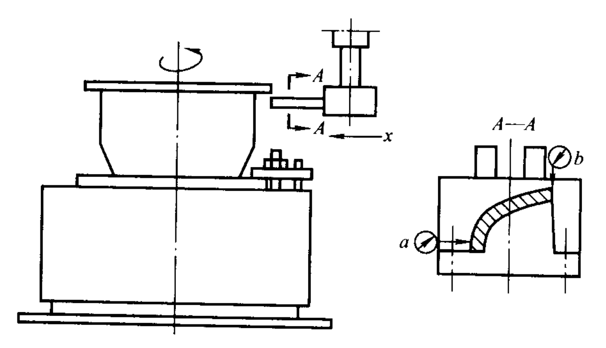


图 2.8-24 加工示意图

故脉冲宽度与脉冲间隔均选为 64 μs，低压峰值电流为 12 A，最好选用高低压复合脉冲电源，在开始加工时，使用高压峰值电流 4～6 A，待电极切入工件，放电面积稍大时，再加上低压电流，方能保证放电加工稳定、持续地进行。

4）当加工至 2～3 mm 深时，应注意观察电极表面黑膜是否均匀，以判定电极找正是否准确。若电极片上、下及左右黑膜均匀一致，证明电极找正良好，可继续加工；否则应及时进行必要的调整，防止加工的槽孔超差。

5）由于脉冲电流偏大，电极又很薄，故电极损耗较大（长度方向约 20%），故加工时应及时修正 X 向进给量。当尖角处损耗超过 5 mm 时，应更换新电极，并再次复核 a、b 向是否与 X 向平行（图 2.8-24）。用过的电极用线切割将损耗部分切除，重行压制、检验后，可继续使用。

6）加工一个槽孔的时间平均为 20 min，为了保证加工稳定，脉冲利用率不宜高，使加工处于半空载状态，避免发生短路烧伤。

对于非通孔深槽的加工，与槽孔加工的工艺略有不同，图 2.8-25 所示为盲孔的深窄槽弹性支撑环，槽宽 3 mm，深度为 35 mm，槽壁厚只有 1.5 mm，采用机械加工十分困难，废品率很高。采用电火花磨削工艺则较为适宜，且加工效率与机械加工效率相近。

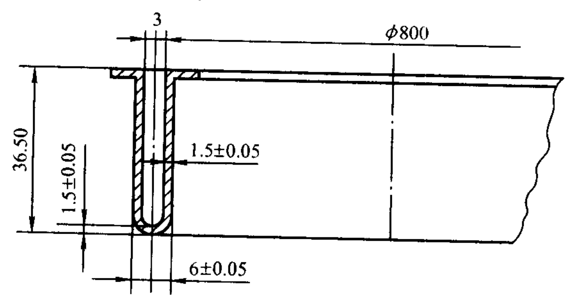


图 2.8-25 深窄槽弹性支撑环结构示意图

由于工件壁厚很小，整体刚度差，且工件总体热容量很小，设计电极和加工时对这两个特点要充分考虑。为此放电面积不宜过大，防止放电部位升温过高引起工件变形；电极的刚度不可超过工件，以防偶然的碰撞造成工件移动或损坏。经过工艺试验，电极弧长不超过加工部位的 4%～5% 为宜。本加工实例电极片弧长取为 100 mm。根据工件槽宽要求及粗、中、精加工余量来确定电极片厚度。粗加工若用 256 μs 脉宽、64 μs 间隔、低压峰值电流 24 A 加工，则单边放电间隙约为 0.18～0.20 mm，变质层厚度约为 0.10 mm；中加工时脉宽及间隔均为 64 μs，单侧放电间隙约为 0.07 mm，此时变质层厚约 0.02～0.03 mm。精加工脉宽选用 2～8 μs，脉冲间隔 16 μs，单侧放电间隙约 0.01 mm。由此。确定粗、中、精加工余量分别为 0.40 mm、0.30 mm 及 0.10 mm，电极片厚度 δ 则为

$$\delta = 3 - 0.40 - 0.30 - 0.10 = 2.2 \text{ mm}$$

加工时，粗加工槽深度为 $35 - 0.25 - 0.10 - 0.01 = 34.64$ mm

电极片夹持部分定为 20 mm；为便于排屑及排气，电极片高度要留出 25～35 mm 裕量。由此确定电极高度为 $35 + 20 + 35 = 90$ mm。实际电极由 100 mm × 90 mm × 2.2 mm 纯铜板压弯制成，压制方法与前述槽孔电极雷同，外弯曲半径按工件中径确定，即 $R_1 = 400$ mm，内弧面 $R_2 = 397.8$ mm。压制成形后，电极略有回弹（约 0.2～0.3 mm），对加工精度没有影响，因为最终加工精度仅与电极弯曲半径最大处及 X 向进给量有关。

由于粗加工 Z 向进刀时，电极下部尖角损耗后自然形成圆角，因此电极片下部不必倒圆角。加工前，电极片应仔细找正。首先要确保电极圆弧的圆心 O_1 与工件圆心 O 在同一直线上，并与 X 轴进给方向平行（参阅图 2.8-26）。其次，要确保电极侧母线与主轴头 Z 向平行，尤其是精加工前，要认真校准允差 0.015/50。因为电极倾斜将导致槽壁倾斜壁厚上下不均匀。

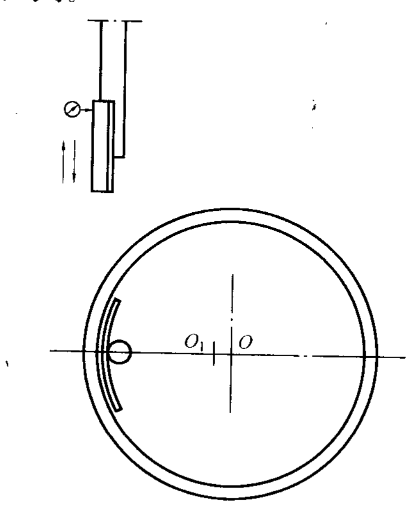


图 2.8-26 电极找正示意图

粗规准加工时，采用 Z 向进给，冲油要充分，工件转速不宜过高，以 5～8 r/min 为好。槽深 15 mm 后，每进给 5 mm，就应提升电极将槽内蚀除物清除，防止蚀除物堆积过多，频繁产生二次放电，使下部槽宽加大，造成工件报废。

中规准加工采用 ± X 向加工。中规准加工余量为 0.30（设计值），实测粗加工后槽宽为 2.57 mm，则中加工余量可加大至 0.33，因而 $\pm \Delta X = 0.165$ mm，当电极外侧面放电后记下 X_0 坐标，则中规准终止坐标值为 $+ X_{01} + 0.165$ mm。$+ X$ 向加工完成后，再进行 $- X$ 向加工。同样是在电极内侧面与工件放电后，记下 X_{02} 终止坐标为 $X_{02} - 0.165$。正负极不可记错，防止槽宽超差。

精规准加工前，应将槽内电蚀产物彻底清除，并除去电极双侧面的积炭。工件转速可适当提高（8～10 r/min），仍然是采用 ± X 向磨削。加工前首先校准电极侧母线与 Z 轴的平行度，误差应小于 0.015/50。因为进给过多容易产生圆度误差，加工时，每次进给量不得超过 0.01 mm。精加工时，脉冲宽度为 2～8 μs，间隔为 16～32 μs，视工件最终表面质量要求选定。进给到终止坐标值后，不可过多地旋转磨削。因为槽内蚀除物及游离碳粒浓度较高，形成二次放电概率很高，长时间地旋转，也会导致工件尺寸超差。

2.4 薄肋类零件电火花加工工艺

某些航空发动机零件要加工如图 2.8-27 所示薄肋（尖薄壁），采用常规机械加工几乎不可能成功，而采用电火花磨削工艺，问题就迎刃而解。

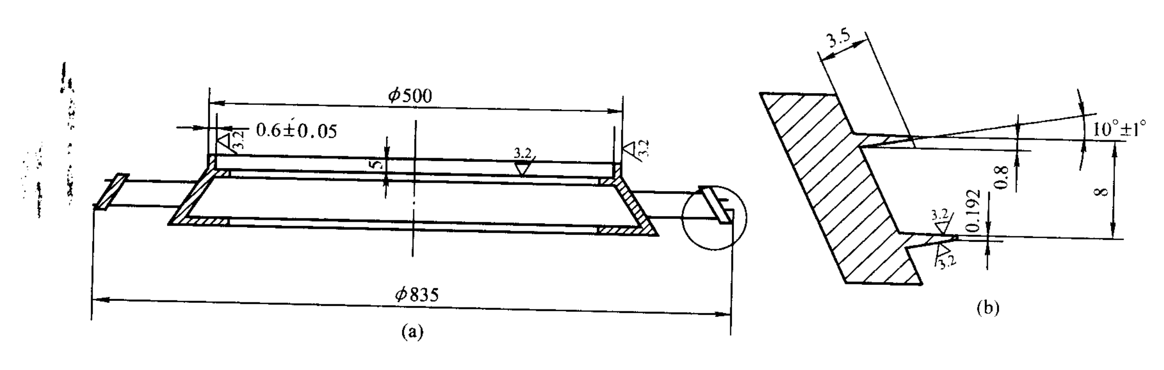


图 2.8-27　封严档板与箅齿示意图

解决此类零件加工的技术关键同样是工具电极的设计与制作。

图 2.8-27 所示零件共有两处需采用电火花磨削，一是图 a 中 ϕ500 mm 端面处要加工一条高度 5 mm、厚度仅 0.6 mm 封严挡板；另一处是在叶片的冠部加工两道封严箅齿，具体尺寸如图 b 所示。由于蓖齿根部厚度为 0.8 mm，高度 3.2 mm，且有 10°斜角，箅齿顶部厚度只有 0.192 mm，加工时不好测量。又由于肋条宽度小，尺寸控制要求很严，因此不宜采用双侧面同时加工的方法。

1）封严挡板加工工艺　这部分加工用工具电极就参照加工弹性支撑环用的电极结构形式，只是电极板厚度可适当加厚，且电极下端面应与工作台面平行，电极侧面应与 Z 向平行（因加工肋条高度尺寸时，要采用 Z 轴进给方式）。电参数选择按前述参数即可。若工件此处余量很大，则可采用大弧长电极 ± X 向进给加工，生产效率可大大提高。

2）封严箅齿加工工艺尺寸小，又分布在大圆周面上，不易测量，也不能采用双侧面同时加工方式，而是采取上、下表面分开加工的方法。

图 2.8-28a 为加工箅齿上表面电极装夹示意图，电极 1 的下表面是工作面：图 2.8-28b 为加工箅齿下斜面电极装夹示意图，电极的上表面是工作面。电极装夹找正时，均依非工作面按 X、Y 两方向用表找平；电极圆弧中心轴线应与工件轴线重合（若不重合，可调整电极的 Y 轴坐标）且平行 X 轴。加工箅齿上表面时 Z 轴正向进给；加工蓖齿下斜面时，Z 轴向向进给。经计算，当箅齿根部为 0.80 mm 时，箅齿的高度为 4.607 mm，通过测量箅齿高度即可控制根部厚度尺寸，最后，再用电极侧面将箅齿高度加工到图样要求尺寸 3.50 mm，零件各部位即加工完成。

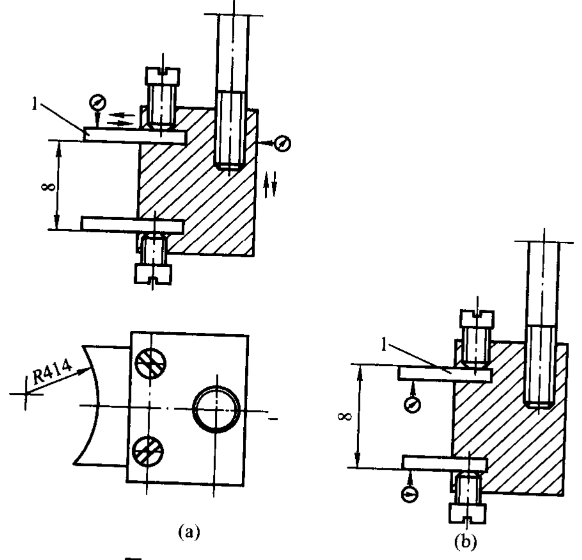


图 2.8-28　箅齿加工用电极夹具示意图

超硬材料的电火花磨削加工，可用于加工聚晶金刚石车刀、拉丝模等。如果采用传统工艺方法加工超硬材料，已被实践证明是不实用、不经济的方法。而利用电火花放电时产生瞬时高温及爆炸力对质地坚硬而脆的聚晶金刚石进行磨削加工，可起到“以柔克刚”的理想效果。有关聚晶金刚石的电火花磨削加工，见 4.1 节。

2.5　深小通孔的电火花磨削

在生产中往往遇到一些较深、较小的孔，而且精度和表面粗糙度要求较高，工件材料（如磁钢、硬质合金、耐热合金等）的机械加工性能又很差。这些小孔采用研磨方法加工时，生产率太低，采用内圆磨床磨削也很困难，因为内圆磨削小孔时砂轮轴较细，刚度很差，磨出的孔呈喇叭形，砂轮转速也很难达到要求，因而磨削效率下降，表面粗糙度值变大。例如，磨 ϕ1.5 mm 的内孔，砂轮外径为 1 mm，取线速度为 15 m/s，则砂轮的转速为 3×10^5 r/min 左右，制造这样高速的磨头比较困难和昂贵。采用电火花磨削或镗磨不用很高的转速，能较好地解决这些问题。

电火花磨削可在穿孔、成形机床上附加一套磨头来实现，使工具电极作旋转运动，如工件也附加一旋转运动，则可提高磨孔的圆度。也有设计成专用电火花磨床或电火花坐标磨孔机床的，也可用磨床、铣床、钻床改装，工具电极作往复运动，同时还自转。在坐标磨孔机床中，工具还作公转，工件的孔距靠坐标系统来保证。这种办法操作比较方便，但机床结构复杂、制造精度要求高。

电火花镗磨与磨削不同点是：前者只有工件的旋转运动、电极的往复运动和进给运动，而电极工具没有转动运动。图 2.8-29 为加工示意图，工件装夹在三爪自定心卡盘上，由电动机带动旋转，电极丝由螺钉拉紧，并保证与孔的旋转中心线相平行，固定在弓形架上。为了保证被加工孔的直线度和表面粗糙度，工件（或电极丝）还作往复运动，这是由工作台作往复运动来实现的。加工用的工作液由工作液管浇注供给。

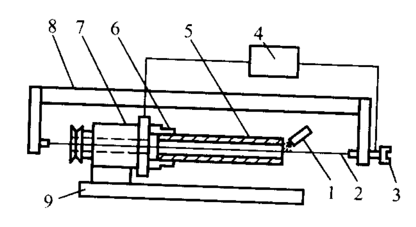


图 2.8-29　电火花镗磨示意图

1—工作液管；2—电极丝（工具电极）；3—螺钉；4—脉冲电源；5—工件；6—三爪自定心卡盘；7—电动机；8—弓形架；9—工作台

电火花镗磨虽然生产率较低，但比较容易实现，而且加工精度高，表面粗糙度值小，小孔的圆度可达 0.003 ~ 0.005 mm，表面粗糙度 R_a 小于 0.32 μm，故生产中应用较多。目前已经用来加工小孔径的弹簧夹头，可以先淬火，后开缝，再磨孔，以避免已磨圆的孔在开缝后又再变形。特别适用于镶有硬质合金的小型弹簧夹头（见图 2.8-30）和内径在 1 mm 以下、圆度在 0.01 mm 以内的钻套及偏心钻套，还用来加工粉末冶金用压模，这类压模材料多为硬质合金。图 2.8-31 所示的硬质合金压模，其圆度小于 0.003 mm。另外，如微型轴承的内环、冷挤压模的深孔、液压件深孔等，采用电火花镗磨，均取得了较好的效果。

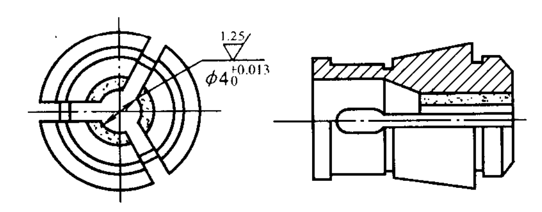


图 2.8-30 硬质合金弹簧夹头

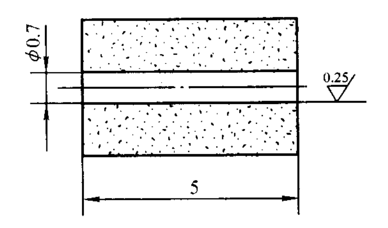


图 2.8-31 粉末冶金压模

2.6 轧辊电火花毛化

大部分冷轧钢板，一般要防止退火过程中卷材的粘着，要增加拉深加工中润滑油膜的保持能力，经清洗后，还要提高钢板表面对喷、涂装饰清漆的附着牢固性，所以不希望表面很光滑，而要进行表面毛化加工（日本称做梨皮面加工）。所谓对轧辊表面进行毛化加工，是靠火花放电把表面加工成无数个小凹坑，使其成为毛糙的表面，其表面粗糙度 R_{max} 约在 100 ~ 10 μm（R_a20 ~ 1.25 μm），根据钢板用途的需要而定。

采用电火花磨削对轧辊表面毛化加工的特点如下。

1）比喷丸、喷砂毛化轧辊的寿命增加 3 倍，减少了备用轧辊数量，可使毛化加工的成本降低。

2）采用电火花毛化工艺，容易测定和控制表面粗糙度，得到均匀的加工表面，其表面比喷砂毛化更有利于吸附油、漆，产品质量将大幅度提高，同时可以避免像喷砂那样产生的粉尘和噪声，从而改善加工环境。

3）加工过程也容易实现自动化，而且因为是不接触加工，所以机械损伤少，维护方便。因此，采用放电加工技术完全可以弥补以往喷丸和喷砂加工法的缺限，这一方法具有很好的应用前景。

图 2.8-32 示出了轧辊电火花毛化加工专用机床的构成。

把轧辊浸置在煤油工作液中，成排的电极与轧辊加工面径向垂直放置，轧辊旋转。在成排电极与轧辊加工面之间伺服控制着微小的间隙，在极间加上脉冲电压进行火花放电加工。

同时，伺服头进行电极的横向伺服进给，此时轧辊工件还作 5 ~ 25 mm 的纵向往复移动，以均化电极的损耗，并在轧辊表面形成连续的放电加工小坑，最终实现整个表面的毛化加工。

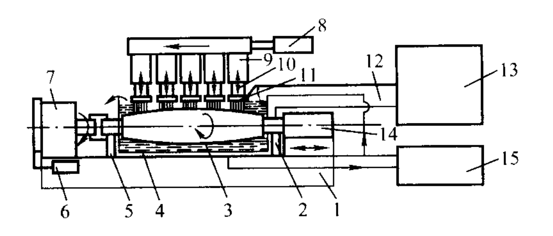


图 2.8-32 轧辊电火花毛化加工机床的构成

1—床身；2—轧辊支承；3—磨光后待毛化的轧辊；
4—加工用的工作液；5—轧辊支承；6—轧辊回转驱动电机；
7—轧辊回转驱动装置(变速箱)；8—横向进给电机(加工中往复移动)；
9—主伺服头（辅助头在反面，有两个横梁）；10—主轴伺服运动；
11—紫铜块工具电极；12—馈电线；13—加工用的脉冲电源；
14—轴向挡盖；15—加工液过滤装置

由于轧辊在轧制钢板过程中会受力变形弯曲，因此轧辊的实际形状应是两端直径稍小、中间直径稍大的腰鼓形，这样在轧制时变形后，才能轧出厚薄均匀而又毛化了的钢板。

2.7 低刚度细长锥杆电火花磨削

在航空、航空的伺服阀机构中，有一种细长锥杆的精密零件，长 30 ~ 65 mm，小端直径 ϕ0.6 mm，大端直径 ϕ1.5 ~ 2.3 mm，要求表面粗糙度 R_a 值为 0.2 μm，由于刚度低，精车、磨削都易弯曲变形，用电火花磨削则可以达到技术要求。

图 2.8-33 是其电火花外圆磨削的示意图，工件 1 锥杆以约500 r/min的转速旋转，工具块状电极 2 一边沿锥面作微量的往复运动，一边径向间歇地伺服进给。工作液为煤油和机油的混合液，从扁喷嘴浇淋至加工表面，只要流量足够，电火花被包容在工作液里面与空气隔绝，就不会引起燃烧，发生火灾。

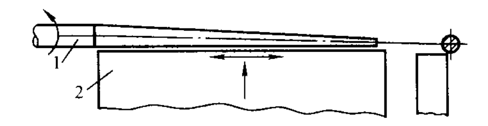


图 2.8-33 电火花磨削细锥杆

磨削分粗、中、精、光 4 个规准进行，逐步依次转换。工具电极为纯铜板块。

粗规准：负极性（工件接负），脉宽 300 μs，脉间 50 μs，峰值电流 10 A，电极损耗较小，目的是去除大部分的余量，并把工件偏心修圆。为此，进给不能过快，应采取只进不退、间歇性地进给方式，否则不易修圆。

中规准：负极性，脉宽 100 μs，脉间 40 μs，峰值电流 4 A，进一步修圆，单边留 0.1 ~ 0.05 mm 余量给精规准磨削。

精规准：正极性，脉宽 10 ~ 5 μs，脉间 10 ~ 5 μs，峰值电流 2 ~ 1 A，进一步修圆修光，留 0.01 ~ 0.005 mm 给光加工规准。

光规准：正极性，采用 RC 线路脉冲电源，$R = 2\,000\ \Omega$，$C = 1\,000$ pF，粗糙度 R_a 值可达到 0.2 μm。

在大批量电火花磨削高精度的细长杆时，哈工大耿春明博士创新性地提出了一种“块状电极切向进给”新方法，可实现电极损耗的自动补偿。今将此块状电极切向伺服进给电火花磨削加工法，简称切向进给法。为了便于对比，将原来的方法称为块状电极径向伺服进给电火花磨削法（可简称为径向进给法）。

（1）块状电极切向进给电火花磨削法的原理

图 2.8-34 为块状电极切向进给电火花磨削法的立体示



意图，是以工件轴线水平放置和工具电极水平进给为例。

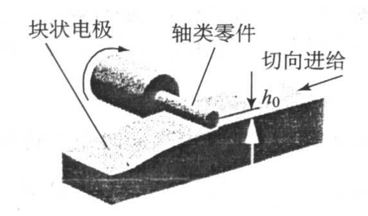


图 2.8-34 切向进给法示意图

切向进给法的基本原理如图 2.8-35 所示，该图是垂直于工件轴线的剖面图。图中是以水平放置的工具电极的上表面作为主要工作表面——加工的尺寸控制表面。R_S、R_B 分别为工件始、末位置时的半径，δ 为放电间隙。加工前应调整电极上表面与工件轴线之间的距离（简称为面轴间距）h_0，令 $h_0 = h_E + \delta$，即使其上表面与半径为 h_0 的工件假想回转圆相切，工具沿着切线方向（水平方向）伺服进给，进行放电加工。

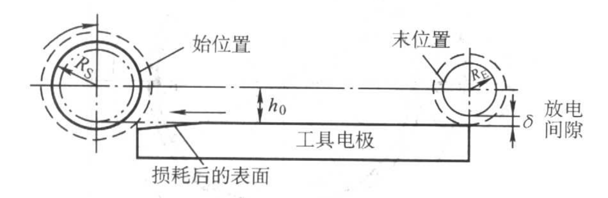


图 2.8-35 切向进给法原理图

切向进给法加工尺寸及精度的控制方式与径向进给法截然不同，如图 2.8-36 所示，径向进给法的电极工作表面是前端面，通过控制电极前端面进给的位置或距离来控制工件的尺寸。其尺寸精度受前端面损耗的影响，加工过程中往往需要多次中断加工，进行尺寸测量。而切向进给法的电极工作表面为上表面，是使工具电极进给一个足够长的距离（图中为最简单的精度控制方式，是使工具电极的全长都通过加工区），工件才退出加工。加工中，电极上表面是由前向后逐渐损耗，切向的伺服进给自动补偿电极的损耗。由于电极损耗的深度由前向后逐渐变小，因此工件是从无损耗或损耗很小的电极上表面退出加工，可以认为工件加工后的半径尺寸 $R_E = h_0 - \delta$（见图 2.8-35）。加工前调整好电极的位置（保证面轴间距 $h_0 = R_E + \delta$）后，加工过程中不必中断和测量。

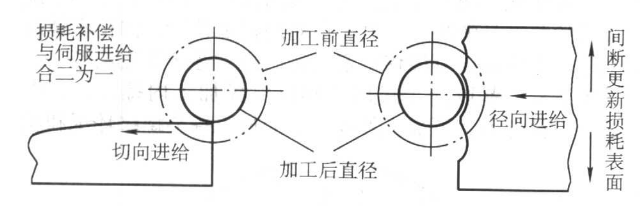


图 2.8-36 切向进给与径向进给的对比

（2）块状电极切向进给电火花磨削法的优点和特点

1）采用块状电极，放电加工区大，蚀除速度大大高于 WEDG（线电极电火花磨削）法。

2）实现工具电极损耗的自动伺服补偿。切向进给一方面提供工具电极所必需的加工伺服进给，同时还实现了电极损耗的自动补偿。既克服了块状电极径向进给法的工具电极损耗补偿困难的缺点，也不需要如 WEDG 法那样的专门的工具电极补偿（走丝）机构。

3）特别适合于批量加工，加工的一致性好。可以使用一块电极，经过一次调整，连续加工一件工件。由于整批工件都是从同一工具电极上表面的同一位置退出加工，因此加工的工件形状和尺寸的一致性好。这一点径向进给法很难做到。

4）可提高加工自动化程度。工具电极一次调整后，可自动磨削工件到预定的尺寸，大大地节省了工序间测量等辅助时间；成批加工时，只需简单装卸工件，减少了每次磨削前的对刀、找正时间，免除了其他人为因素的影响；采用合理的编程，可以实现、中、精加工在一次进给过程中连续完成。

5）变相地细化了进给的脉冲当量。从图 2.8-35 中可以看出，切向进给法在加工过程中类似于作小角度的斜面进给，实际产生的单个脉冲径向进给量被大大地细分缩小。微小的进给脉冲当量有利于伺服进给的稳定性，特别对于精微电火花加工更为有利。微小的进给脉冲当量同样导致回退速度的显著降低，可能存在不易快速切断电弧的缺点。好在电火花磨削加工不易产生电弧，也可在软件上采取措施，防患于未然。

6）工具电极的利用率高。切向进给法电极损耗的自动补偿，不是像 WEDG 法那样的硬性补偿，而是一种自动伺服补偿，即根据工具上表面与工件“接触”部位的损耗情况，自动进行补偿，工具电极没有多余的补偿移动。可见，伺服补偿方式可以最大限度地提高工具电极的有效利用率，是一种比较理想的电极损耗补偿方式。在成批加工时，工具电极已损耗的表面自然而然地参与到下一工件的加工，使工具电极利用更充分。上表面完全损耗的工具电极，重新修平其上表面后可以继续使用。因此切向进给法的工具电极利用率要高于径向进给法和 WEDG 法。

7）工具电极的制造、定位和调整水平要求较高。在切向进给法中，由于工件母线的形状和位置是电极工件表面形状和位置的反拷，电极的制造质量（制造精度和表面粗糙度）、安装定位和对刀精度，直接影响到工件的加工质量，因此在这方面应该有比较高的要求。

3 双轴共轭回转式和展成回转式电火花加工新技术

原国营南京江南光学仪器厂孙昌树等在《共轭回转式电火花精密加工新工艺系统》、《展成回转式电火花精密加工设备》、《电火花加工精密平面和球面新技术》等国家发明奖的基础上，创造出双轴共轭回转式和展成回转式电火花加工机床和工艺的新技术，可用以电火花加工精密的内外螺纹、齿轮，内外球面、曲面和平面等，补充、丰富和发展了电火花成形加工工艺和机床设备。

3.1 双轴共轭回转式电火花加工

双轴共轭回转式电火花加工是使工件上某一角方位在加工过程中始终与工具电极上某个或某几个固定角方位保持对应重合关系。这种运动方式中，工件与工具电极间切向相对运动线速度的值可以很小，有时几乎接近于零。此外，由于它是非接触式加工，加工时不产生明显的机械作用力，加工区域又不断循环转移，因此工具与工件的对应加工面积可以很大而不致降低机件的运动精度。因此，它与机械磨削运动已有很大的不同，而且常常是机械磨削所不宜或不能直接采用的工作方式。

双轴共轭回转式可分为共轭回转式和行星共轭回转式二种形式，每种又均可按运动关系分成同步、倍角、差动方式加工，按位置关系分成内接、外接和交接式，可解决数十种通常难加工或无法加工的工件类型的加工问题，有一系列有利的技术特点。

下面用简化的图形说明共轭回转式和行星共轭回转式两种回转运动方式的基本原理。图中符号意义：

O_1、O_2—轴线；θ—瞬间转角；P—对应加工点；e—轴线交角；O_3—公转轴线。

(1) 共轭回转式

1) 同步共轭回转式 如图2.8-37所示，工具电极与工件的任意对应转角始终保持相等，即 $\theta_1=\theta_2$，点 P_{11} 与 P_{21}，P_{12} 与 P_{22}，P_{13} 与 P_{23} 等具有固定的对应加工关系。

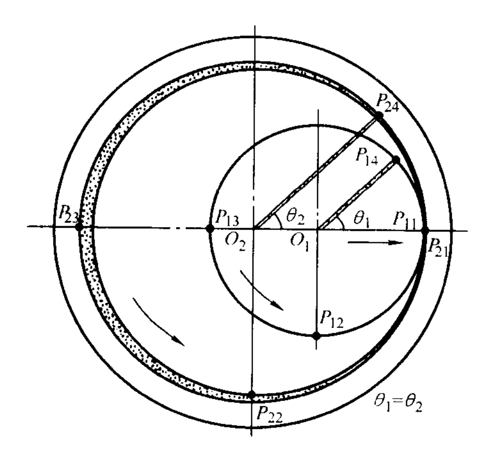


图2.8-37 同步共轭回转成形原理

2) 倍角共轭回转式 如图2.8-38所示，工具电极与工件的任意对应转角成某一整数倍，即 $\theta_1=K\theta_2$，或 $\theta_2=K\theta_1$ 式中 $K>1$ 的整数（$K=1$ 时即同步式）。点 P_{11} 与 P_{21}、P_{25}，点 P_{12} 分别与 P_{22}、P_{26}，点 P_{13} 分别与 P_{23}、P_{27} 等具有固定的对应加工关系。

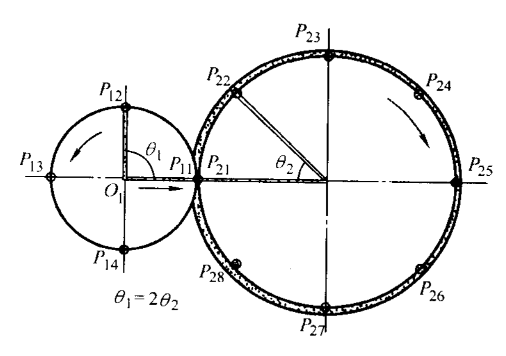


图2.8-38 倍角共轭回转成形原理

3) 比例差动共轭回转式 如图2.8-39所示，工具电极与工件的任意对应转角之比 $\frac{\theta_1}{\theta_2}=\frac{K_1}{K_2}$。式中 K_1、K_2 为整数，$\frac{K_1}{K_2}=1$ 时成同步式。K_1 与 K_2 中有一个等于1而另一个大于1时成倍角式。点 P_{11}、P_{12}、P_{13} 等分别与 P_{21}、P_{22}、P_{23}、P_{24} 成逐次交替的固定对应加工关系。

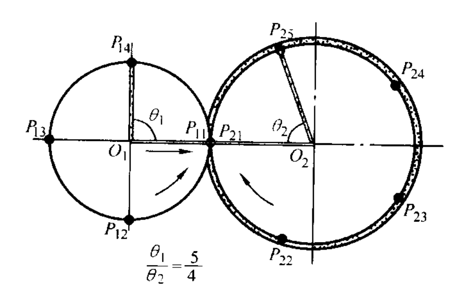


图2.8-39 比例差动共轭回转成形原理

共轭回转式可用于加工精密内、外螺纹，硬质合金螺纹环规，锥度螺纹环规，小直径滚珠丝杆螺母，多线头螺纹模具，各种淬硬精密齿轮，变模数双线型齿轮，各种静压轴承对称油腔等。

(2) 行星共轭回转式

如图2.8-40所示，工具电极同时作自转和公转，使两者的转角比为 $\frac{\theta_{自}}{\theta_{公}}=\frac{K_1}{K_2}$。式中 K_1、K_2 为整数，以满足共轭回转的条件，点 P_{11} 与 P_{21}、P_{25}、P_{29}，点 P_{12} 分别与 P_{22}、P_{26}、P_{210}，点 P_{13} 分别与 P_{23}、P_{27}、P_{211} 等具有固定的对应加工关系。从相对运动能够构成的加工成形条件来看，它与前面几种共轭回转式相类似。但有一个特点，就是在加工过程中只有工具电极运动，工件不动，这样对某些不便于做精确回转运动的大工件加工时就有它的长处。

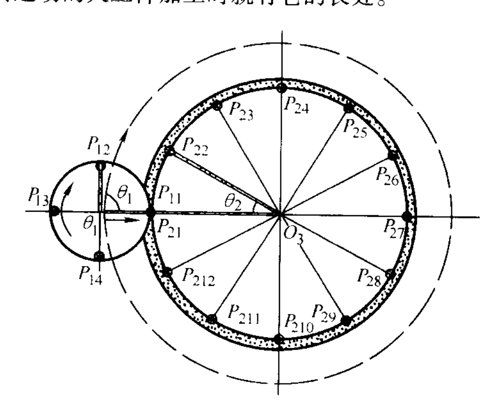


图2.8-40 行星共轭回转成形原理

行星共轭回转式也可用于加工各种内外精密螺纹、齿轮及静压轴承、静压导轨的高对称度油腔等。

以下用示意图2.8-41～图2.8-53来说明共轭回转式电火花加工的多种类型，而用示意图2.8-54～图2.8-59来说明行星共轭回转式电火花加工的多种类型实例。图中还分别标明了工具电极和工件的适宜转向以及加工进给方向，工件需蚀除的部分则用细点标出，并且假定工具电极在加工过程中没有损耗（实际上是采用电极损耗补偿措施得到与无损耗电极加工十分近似的效果），所列举的类型，一般都在技术经济效果的某些方面具有优点而胜过传统的机械加工方式，或能弥补机械方法的不足，解决一些难加工问题。从技术上讲，除了需要保证按图示方式实现精确的相对运动外，另一个决定成败的关键是解决工具电极损耗的精确补偿，如精密螺纹加工时采用的轴向分段移位定量径向进给逐步逼近法等。

图2.8-41是以同步式用外螺纹电极加工内螺纹，若电极置于工件外侧，可加工外螺纹。如加工各类螺纹环规和丝

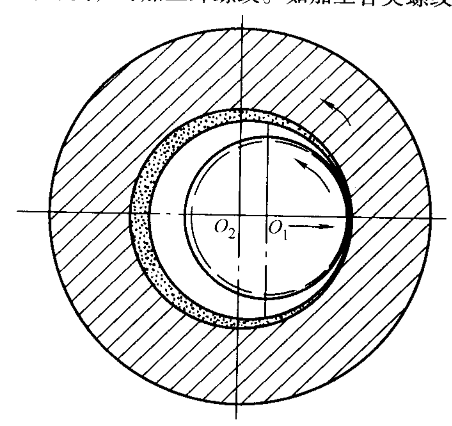


图2.8-41 共轭回转式加工内螺纹



规，各种牙形的精密内、外螺纹，多线螺纹、滚丝模、螺纹板牙等工具和金属压铸模、塑料模等型腔模具以及某些零件的精密螺纹。

将图2.8-41改成倍角式，特点是可采用单线螺纹电极加工多线螺纹，克服多线螺纹电极（以同步式加工）本身制造上的偏差，所以加工出的多线螺纹的分线及牙形对称精度可以很高。

图2.8-42是用圆柱形螺纹电极以工件轴线偏角方式加工圆锥管螺纹，能加工锥度螺纹环规和丝规，金属压模、塑料模等型腔模上淬硬螺纹。

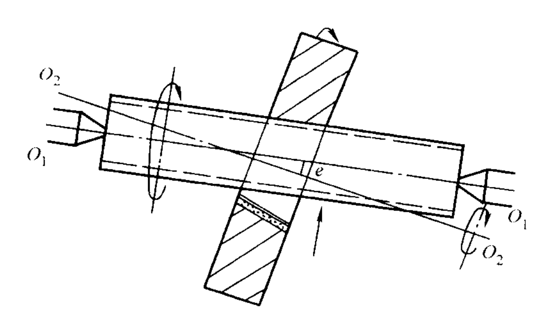


图2.8-42　轴偏式加工锥度螺纹

图2.8-43是用外齿轮电极加工内齿轮或两个齿轮的对合加工。若电极置于工件外侧，可加工外齿轮。运动方式与齿轮啮合传动状态相一致，但两者各自按一定关系回转，没有主动和从动之分，因而与跑合加工不同，宜以比例差动或使工具电极上的各个齿与工件上加工成形的齿有较多的机会轮翻交替对合加工，有利于使电极制造上的局部缺陷展匀化和消除齿形不对称偏差。只要机床的运动精度足够高，就可以加工出齿形一致和对称精度非常高，从而具有良好啮合性能的齿轮工件，或最终以配对齿轮作对合加工成精密齿轮组。能有效地加工内、外直齿轮、斜齿轮、直纹模、滚花模、花键孔等模具和零件，特别有价值的是用于加工需要淬硬的作为冲模、挤压模或金属、塑料型腔模用的精密小模数齿轮，其中如内斜齿轮和螺旋角大于45°的外斜齿轮都是机械磨削很难解决的类型，这种加工方式不论齿形、旋向均可适用。

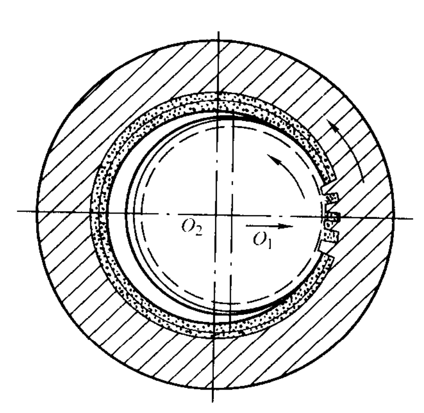


图2.8-43　共轭回转式加工内齿轮

图2.8-44是加工特殊功能新结构的液压马达输出轴上的变模数双线型齿轮或两个齿轮的对合精加工。特点是在一个齿轮上有模数不等的齿，小齿是渐开线，大齿是摆线（也可以是渐开线或其他线型），齿形本身及其对称精度要求高，需要淬硬，机械加工难以解决。工具电极以外齿轮为基本形状，工件的小齿部分直接利用渐开线齿形的回转共轭特性加工成形，工件的摆线形大齿部分则由电极上的直线轮廓缺口槽通过共轭回转加工成形。这是利用了摆线齿形在某一特定的节径比和转角比条件下它的回转共轭线为一直线的性质。因此，给电极的制造提供了方便，用同一种规格的工具电极，改变电极和工件的转角比及轴线距离，可以加工出具有不同大齿数，但分布对称，并且与电极各部分齿形均有良好啮合特性的变模数齿轮，这种加工方式已为新颖的具有优良工作性能和效率高、体积小的液压马达、液压泵转子等的结构设计提供了一项非常有效的加工工艺手段。

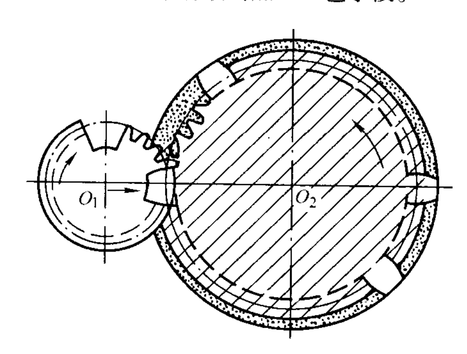


图2.8-44　倍角共轭式加工变模数齿轮

图2.8-45是用圆柱形齿轮电极加工插齿刀。先使两轴线交叉成 e 角，以形成插齿刀的后角，然后再使两轴线相互平行，形成切削刃和对齿形部分进行精修整形，能适用于加工各种齿形的插齿刀。

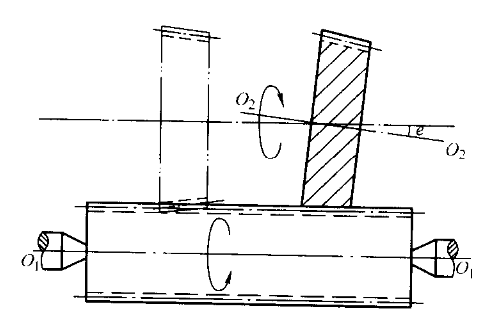


图2.8-45　齿轮形电极加工插齿刀

图2.8-46和图2.8-47是用外圆锥齿轮电极加工内、外圆锥齿轮或两个齿轮的对合加工。两轴线按齿轮啮合要求交叉安置，适用于需要淬硬的或机械难加工材料制的圆锥齿轮加工，以得到齿形一致和对称精度高而且具有良好传动啮合性能的齿轮组，对加工冷挤、热压模、金属、塑料压铸模、精锻模上的齿轮型腔尤为方便。此外，还能在不制造十分复杂的刀具和机床的情况下，用一种大齿轮状工具电极直接加工出诸如具有良好啮合特性的很大减速比的准双曲线锥齿轮组等。

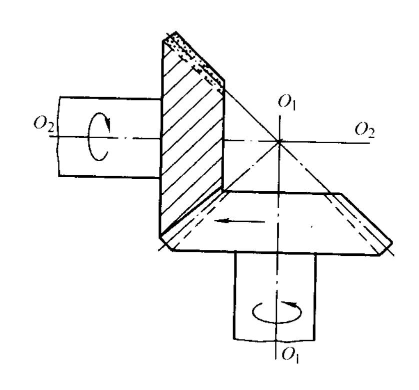


图2.8-46　外圆锥齿轮成形或对合加工

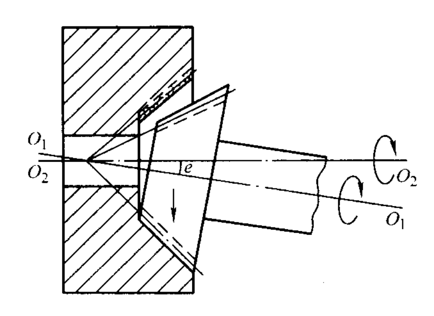


图 2.8-47 内圆锥齿轮成形或对合加工

图2.8-48是用蜗轮电极加工全啮合蜗杆，然后再用类似方式使蜗轮蜗杆副作对合加工，可以得到用机械方法很难制造的传动啮合性能和承载能力特别好的偶合件。

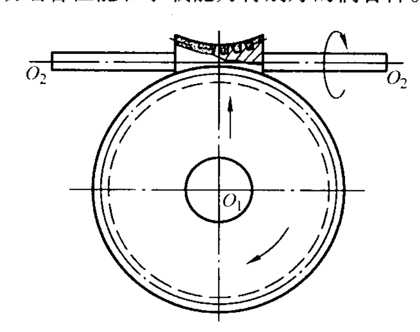


图 2.8-48 全啮合蜗杆副的加工

图2.8-49是利用倍角式加工时成形高度对称的特点，用极易制造的工具电极加工静压轴承油腔。对于静压轴承来说，等分面油腔（油腔数为偶数时成相对面）的对称性（包括几何形状和尺寸）是决定轴承精度的很重要指标。电火花加工比机械加工既简便，质量又可靠。

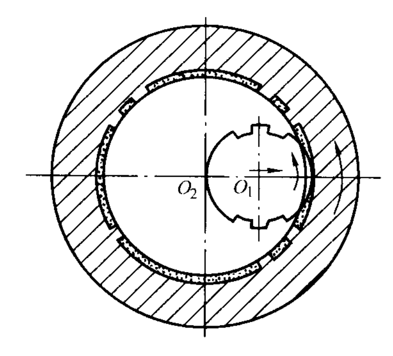


图 2.8-49 加工静压轴承对称油腔

图2.8-50是用带锥度的工具电极加工锥形静压轴承的高度对称形油腔，通常以两轴线交叉安置的方式进行加工有利于成形，由于锥形静压轴承加压力油时每个油腔沿径向和轴向均有推力，因此必须使每个油腔的几何形状、尺寸、角方位具有高度对称性（对于油腔的几何形状和绝对尺寸则要求并不高），才能达到高精度的要求，然而在锥面上用机械方法加工油腔较难精确成形，电火花加工则简便有效。由于按倍角关系用单一型电极连续回转辅以缓慢的径向进给加工，电极损耗实际上不会影响油腔成形的高度对称性。

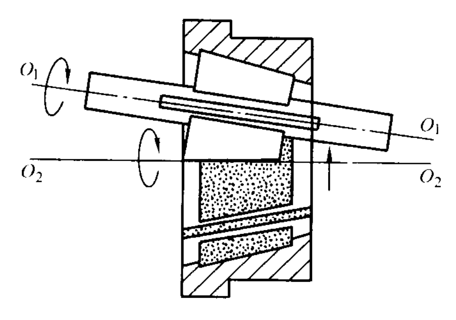


图 2.8-50 加工锥形静压轴承油腔

图2.8-51是加工滚压字模，按需要在工具电极外圆柱面上刻好字符，用使电极低损耗方法加工成形。电极上的正体凹字加工出模具上的反体凸字。一般宜使对应加工部位的切向线速度超于相等，避免字形失真。用具有条纹或网状滚花纹的电极可加工滚花模。

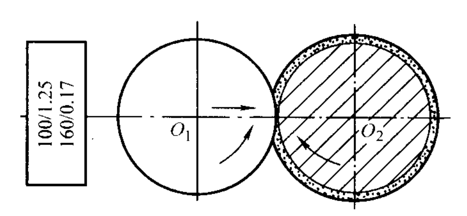


图 2.8-51 加工滚压模凸型字符

图2.8-52是用外齿轮电极加工大直径齿轮块，两者在节径相切点的线速度应相等，以构成共轭运动的条件。除加工齿轮块零件外（特别是淬硬件），还可以方便地加工节径很大的梳状整形插齿刀或刨齿刀，由于电极直径可以在很大范围内选取，对于不同节径（即使很大）的齿轮，只需按选定的电极尺寸改变摆动转角比和轴线距离，很有利于采用最容易加工达到高精度指标的电极尺寸，从而得到高质量的加工件。为提高加工效率，采用回摆运动，按类似方式可用螺纹电极加工大直径螺纹块（如弧扇形搓丝板）。

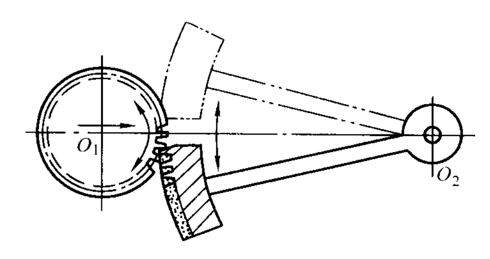


图 2.8-52 加工大直径齿轮块

图2.8-53是利用工具电极上的一对径向直线轮廓以回摆方式加工形成摆线齿形样板刀，它比以机械加工此类样板刀所常用的缩放绘图逐点加工法更为精确，线型面过渡平滑，十分接近于理论上按滚圆运动形成的数字摆线，而且不需要进行反复的坐标点计算，加工也非常方便，当电极节径与刀齿节径之比为1:2而电极与工件的转角比为2:1时，可以形成具有良好共轭特性的摆线齿形。

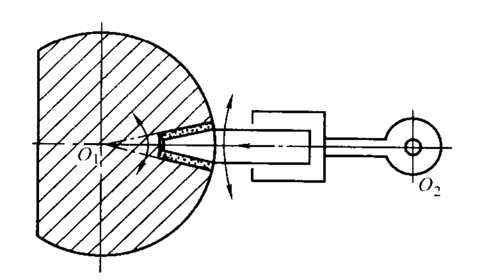


图 2.8-53 加工齿形样板刀

以下图2.8-54～图2.8-59为行星共轭回转式电火花加工类型的实例。



12

图 2.8-54 是用外螺纹电极加工外螺纹。若电极置于孔内，可加工内螺纹，不论牙型、旋向、公制、时制和线数多少均可加工。尤其适宜于加工金属压铸模，塑料模等模具上的型腔螺纹及各种已淬硬模具或机械难切削加工材料制的大机件上的连接螺纹。只要行星机构的运动精度高，同样可以加工各种精度内、外螺纹零件或量规。加工多线螺纹时取 $\frac{\theta_{自}}{\theta_{公}}=K$ 为整数，工件螺纹的线数就能增为 K 倍。

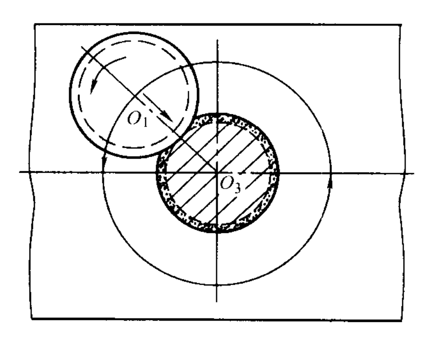


图 2.8-54　行星式加工外螺纹

图 2.8-55 是用外齿轮电极加工内齿轮或两个齿轮的对合加工，若电极置于外侧，可加工外齿轮。转角比的选取应符合共轭回转成形的条件。通常与齿轮啮合运动状态相一致。这种加工方式对于只要能实现行星式啮合传动的齿轮，不论它的齿轮是渐开线、摆线及其他线型，或是直齿、螺旋齿、左旋、右旋等均可适用。

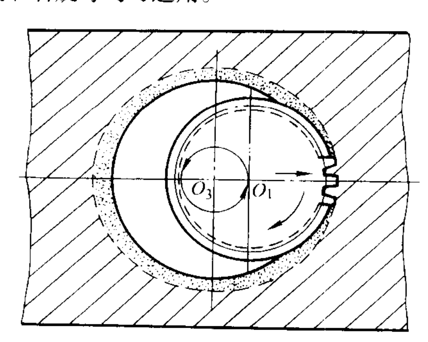


图 2.8-55　行星式加工内齿轮

图 2.8-56 是用制造方便的工具电极加工几何形状和尺寸高度对称的静压轴承及静压导轨的油腔。使 $\frac{\theta_{自}}{\theta_{公}}=K$，取 $K=3$，相隔 120°的三个方位的油腔具有对称性，正符合静压轴承的工作性能要求。

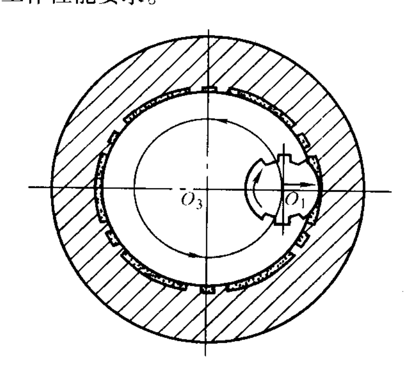


图 2.8-56　行星式加工静压轴承油腔

图 2.8-57 是在环形平面静压导轨上加工，自转轴线与公转轴线相互垂直，取 $K=4$ 所有油腔全部对称。

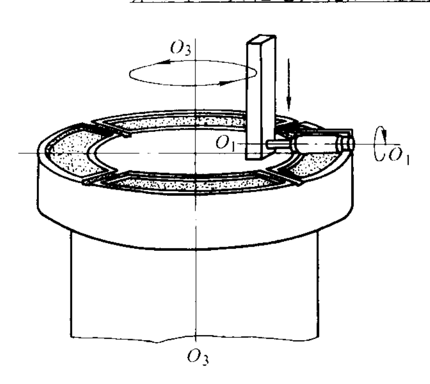


图 2.8-57　加工静压导轴对称油腔

图 2.8-58 是用卷绕在圆柱体上的螺旋状金属丝作工具电极，在圆锥面上加工两端不通头的螺旋状油槽，自转轴线与公转轴线交叉成一定角度。比机械加工方便，效率高、质量好。

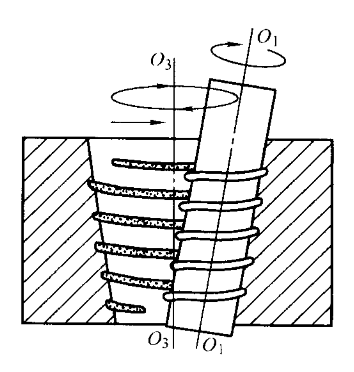


图 2.8-58　加工不通头螺旋油槽

图 2.8-59 是用外圆锥齿轮电极加工内圆锥齿轮或两个齿轮的对合加工。两轴线按齿轮啮合要求交叉设置。按工件的齿数选择工具电极的齿数及转角比，尽可能做到电极上的每个齿均有机会与工件上任意一个齿交替对合，有利于提高加工精度。

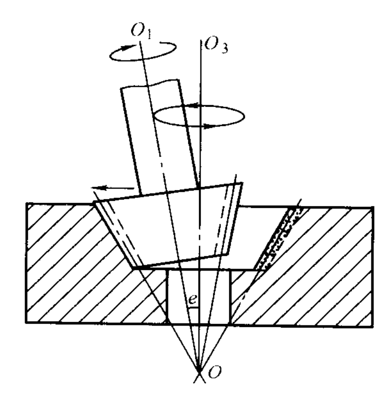


图 2.8-59　行星式加工内圆锥齿轮

综合分析以上实例，可以从下列几方面利用共轭回转式电火花加工。

1）按确定形状的工具电极加工出它的回转共轭体。

2）使两件已用机械方法分开加工好的共轭回转偶合件作对合加工，以提高啮合精度，对于某些已受磨损的偶合件，也可以用对合加工进行移距修复。

3）按功能需要设计出一个回转体的线型，不必通过详细的对应坐标计算就可以直接加工出它的回转共轭体。

4）可以由一个基本线型加工出它的一次成形回转共轭体，再以一次成形体为工具电极，就能加工出另一个二次成



形的回转共轭体。依此类推，可以从技术上解决多次成形回转共轭体的加工，研制出许多种具有特殊线型轮廓的回转形机件。

3.2 展成回转式电火花加工

本节所述展成回转式电火花加工的含义是工具电极与工件或二者之一除作回转运动外，相互间还同时作展成成形加工运动，可以是没有固定加工对应点关系的差动式，也可能是具有固定对应加工关系的共轭式（前述双轴共轭也属于展成式的范畴，因其创新特征性强且自成一体，因此分别叙述）。

展成式加工的一些成形运动方式与通常的磨削展成运动相似，如加工内外圆柱面、圆锥面及各种旋转成形曲面，加工刀具的等速螺旋线型部分及各种凸轮线型等。另一些展成方式则是磨削所无法采用，属于新开辟的工艺途径，如用齿条状工具电极直接加工齿轮零件或插齿刀（即不需用传统的滚齿机或磨齿机就能很方便地加工出淬硬的精密齿轮状工件），用蜗轮状工具电极可直接加工出全啮合蜗杆，一次展开成形二次曲面，搓丝板，星点板等复杂型面，实现各种微小型工件的精密尺寸加工，某些运动偶合件的对合精加工等。

展成运动具有多种多样的构成方式，它的特点之一是常常可以用几何形状比较简单的工具电极，通过展成运动加工出型面比较复杂的工件。工件与工具电极间加工点附近的切向相对运动线速度的变化范围也较大，其值决定于成形的性质和要求。

常采用的展成方式有：平面展成、球面展成、棱面展成、旋转面展成、共轭展成、等速螺旋展成和坐标展成等。

1）平面展成式　有多种电火花加工展成平面的方式，如采用圆柱形回转电极，利用其端面作平行于端面方向平移运动或利用其圆柱面做在平面上滚动式的加工。但在这些加工方式中会存在加工过程中排屑排气不良，电极加工部位损耗不均匀，工件边缘棱角成形不佳等问题，因而很难达到精密加工的要求。图 2.8-60 所示采用双轴差动回转展成平面方式可以克服上述各种弊端，高效地加工出精密平面，并实现镜面加工。其工作方式是工件和工具电极分别绕自身轴线作回转运动，两条轴线相互平行，通常位于与坐标工作台面平行的同一平面内。工具电极采用薄壁圆筒形，沿轴向进给，加工过程中电极本身的损耗使其端面得到自修整，进入正常稳定加工状态时工具电极端部形成窄环面，对准工件端面进行火花放电加工。若电极筒壁通过工件回转轴心，则可以加工出整体平面。若不通过工件回转轴心，则可同时加工环形平面和内外圆柱面（图 2.8-61）。如果还需精修与平面相邻的圆柱面，可使电极再附加径向进给。被加工平面的几何精度主要取决于机床的动态精度和工件转轴与工具电极转轴的平行度。

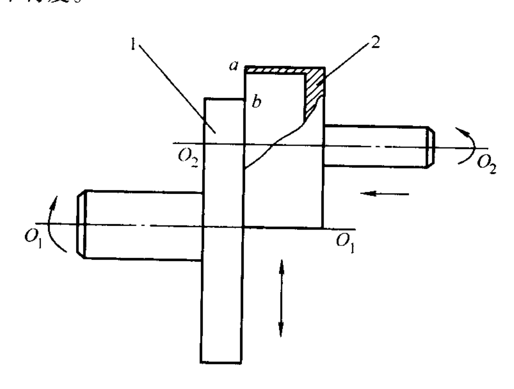


图 2.8-60　双轴差动回转展成平面

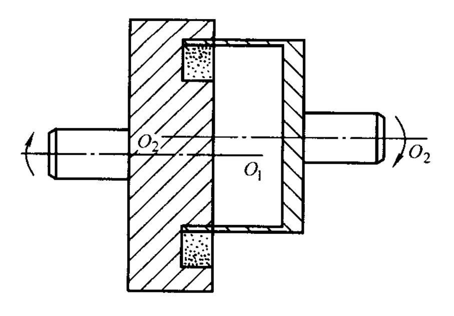


图 2.8-61　端平面和圆柱面一次展成

2）球面展成式　采用双轴差动回转展成平面的运动部件和薄壁圆筒形工具电极，增设一个转动机构，使两转轴在同一平面内，并可调整轴的方向以形成一定的交角，就可如图 2.8-62 和图 2.8-63 所示加工内外球面。工件 1 绕轴线 O_1O_1 回转，工具电极 2 绕轴线 O_2 回转，两轴线相交成 θ 角，所在平面通常与坐标工作台面平行，加工时工具电极作轴向进给，工件经加工后形成的球面半径为 R。因为球面被任一平面相切割时其截面均为圆形，而薄壁圆筒的回转轴线通过球心，因此该电极圆筒端面周边与工件球面能够贴合。加工开始时工件上需蚀除的余量总是凸出在球面之外，工具电极的初始位置是沿自身转轴后退一段距离（图中虚线所示），加工过程中回转工件上的余量逐渐被蚀除，而电极本身的损耗逐渐自动修整其端面成窄环形对工件进行加工，最后形成需要的球面。选用合适的电极半径并相应调整两转轴的交角，可以如图 2.8-64 和图 2.8-65 所示加工内外超半球面。

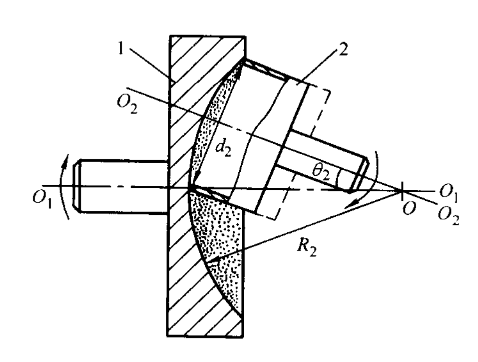


图 2.8-62　双轴回转展成内球面

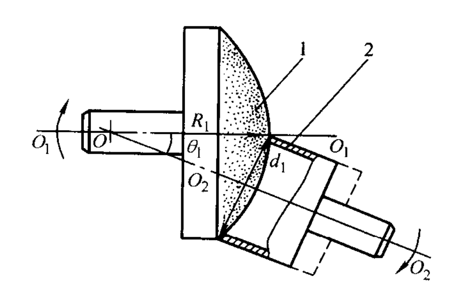


图 2.8-63　双轴回转展成外球面

3）棱面展成式　棱面展成式加工是展成回转式加工中最简单的一种，回转式工具电极的工作面通常由直线、圆弧、曲线或其他复合线型绕固定轴线旋转而形成。当工具电极沿与轴线平行的回转圆周切向作直线进给运动或以径向进给而作直线往复运动时，对于工件进行全切入加工后形成棱面。它的工作方式类似于采用成形砂轮磨削，但是往往比成形磨削具有更多的好处，如前面所提到的工具易制、易整修等。而且即使加工面很宽，轮廓线型较复杂，也能顺利地一次展成精确的棱面。当用成形砂轮磨削加工面较宽时就容易



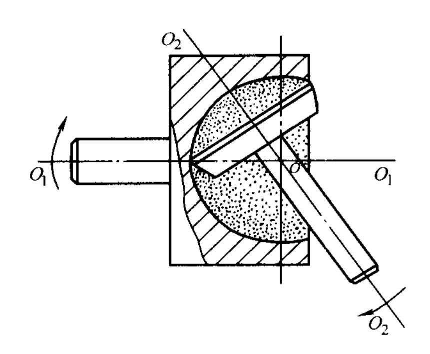


图 2.8-64　展成加工内超半球面

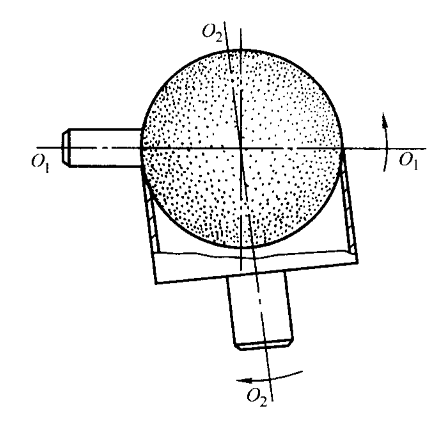


图 2.8-65　展成加工外超半球面

产生机械震动而影响棱面的成形质量。通常情况下，它还有加工效率高和工具费用低等优点。

图 2.8-66 是用旋转抛物面型石墨电极加工抛物柱面样板或冲压、塑料模等。电极由梳刀修刮成形，而且在加工过程中可以随时整修。也能按此方式直接加工抛物柱面反光镜，这种镜面可使平行光束聚集成光带，如用作激光光源激发器的聚光件，也可使线状光源转换成平行光束，若用机械方法精加工这类曲线柱面是非常困难的。

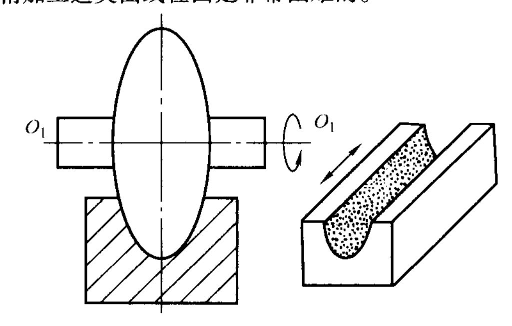


图 2.8-66　旋转曲面展成曲线棱柱面

图 2.8-67 是用旋转成形工具电极以展成方式加工棱柱面。适用于冲模凸模，工具电极，曲线棱柱面体等工件的加工。

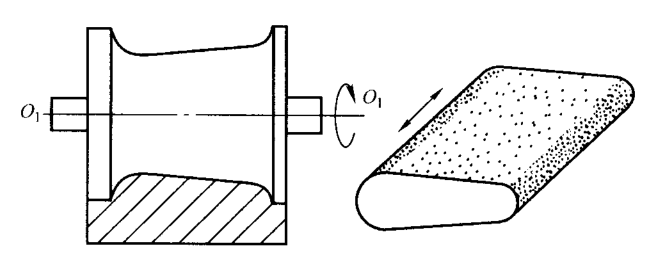


图 2.8-67　旋转电极加工棱柱面

图 2.8-68 是用多环状电极加工淬硬精密齿条或者对淬硬齿条进行精修整形，可以达到很高的加工精度，而且加工效率也远比机械逐齿磨削高得多，特别适宜于小模数长齿条的加工，用类似方式可以加工搓丝板和星点压平模板等。

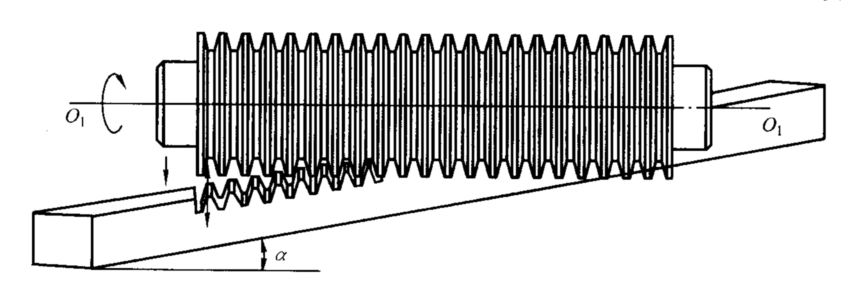


图 2.8-68　展成加工齿条工件

4）旋转面展成式　旋转面展成式加工是展成回转式中比较简单的一种，它直接利用工具电极与工件所作的回转运动（以转角差动状态），使工件加工成与回转工具电极线型轮廓能准确对合的回转形偶合体，随着工具电极所取的线型轮廓和两转轴不同的安放角度，可以加工形成柱面、锥面、平面或曲面，它与成形砂轮磨削相比有与棱面展成相类似的长处。

图 2.8-69 是用曲线回转体形手柄状工具电极以转轴平行设置方式加工塑料压模，压模以手柄中心对称面分为两半，预先组合车制成形，淬硬后用展成式电火花精加工，可以使型面线型过渡光洁圆滑。这种内型腔用机械磨削有困难，若在电火花型腔加工机上分两次加工，则合缝不容易对准，而且平动头精修时，底面还会产生局部展平变形区。由于排屑排气条件差和不能利用差动特性提高表面质量，所以型面的表面质量也远比回转式加工差。

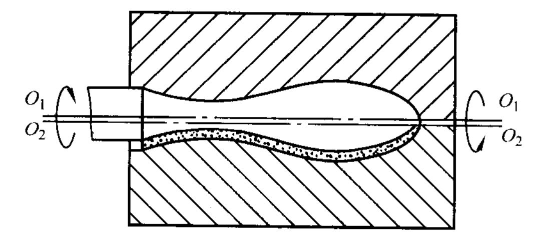


图 2.8-69　展成加工手柄塑料模

图 2.8-70 是用圆筒状电极加工圆截面形密封橡胶圈的压模环道。两转轴重合设置，电极上开有一些辐向槽，作排屑排气用，电极的基本轮廓尺寸十分接近于所要求的型腔尺寸，工作面随时可用型刀修刮，可以将二件模块加工达到很高的对合精度。图 2.8-71 是用转盘状电极加工同样的环道，但两转轴相互垂直设置。这样的布局比图 2.8-70 有二大优

点：一是电极直径尺寸可以适当增大，以减少相对损耗；二是电极与工件的相对位置可调整，因此同一电极可以加工相同截面形而半径不同的环道。缺点是加工对应面比前者减小，加工效率稍低。圈径小时存在微量的干涉偏差，使半圆形截面轮廓略产生变形。

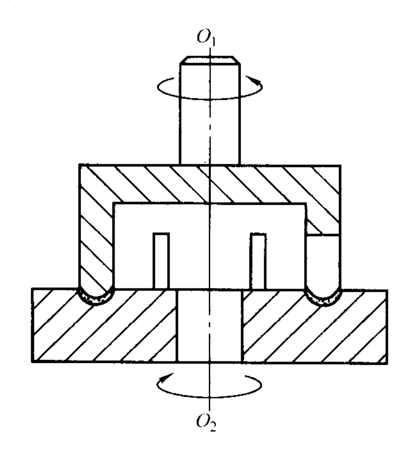


图 2.8-70　展成加工橡胶圈压模 Ⅰ

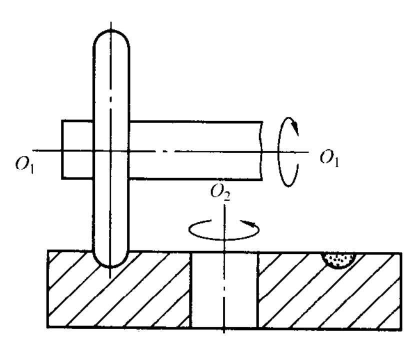


图 2.8-71　展成加工橡胶圈压模 Ⅱ

5）共轭展成式　共轭展成式的特点是工具电极上任何一个点与工件上固定的加工点相对应。通常都是用简单易制的线型面电极借展成运动加工形成较复杂的精确的线型面，如利用直线展成为渐开线或摆线，利用平面字型转换成柱面字型。运动形式上常采用往复式解决直线运动的回程问题，相应的用回摆式代替转动，以保证直线运动与转动之间的共轭协调关系。

图 2.8-72 是用容易制造的平面字型、图案的凹型电极在圆柱形淬硬滚压模上加工成凸型字、图。这种凸型滚压模机加工困难，一般用手工雕刻，对制作人员的工艺水平要求很高，专业技术训练很不容易，而且刻好后再淬硬，由于工作部分是细凸线条，对热处理的要求也高。然而平面状的凹字型电极利用普通的刻字机刻制很方便，即使一些带艺术性的图案需要人工刻制也并不费事。可以利用电极低损耗条

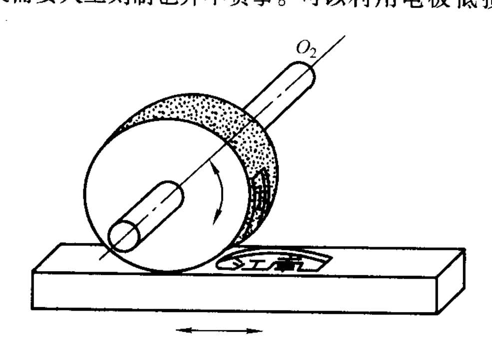


图 2.8-72　展成加工滚压字模

件，使工件一次成形。加工相切点处的切向线速度要取得接近相等，避免字、图失真，当然有时也可以用不等速运动加工出切向变形字、图。

图 2.8-73 是用齿条状工具电极以共轭展成方式加工齿轮，可以在没有磨齿机和其他齿轮加工设备的条件下直接加工淬硬齿轮及硬质合金齿轮等。

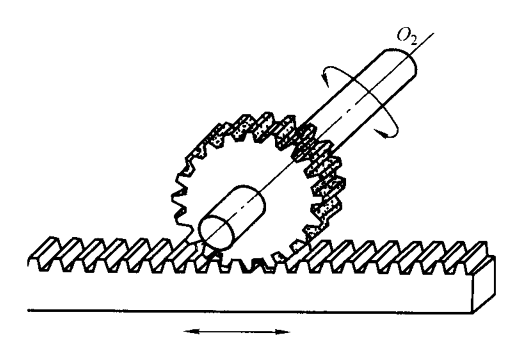


图 2.8-73　齿条电极展成加工齿轮

6）螺旋展成式　量具、刀具、模具中经常需要在淬硬工件上加工成精密螺旋型面，机械加工这类型面通常采用磨削方法，但是往往有一些型面由于结构形状、位置、尺寸及材料特性等方面原因不便采用磨削，有时就只能在淬硬前加工，热处理的变形量由手工修磨。这样既费事，加工质量也没有保障，采用螺旋展成式电火花加工可以弥补传统工艺手段的不足。

图 2.8-74 是用圆柱形电极精加工靠模螺旋槽，型槽在工件淬硬前先铣削成形，然后分别加工左右两侧面，因为这样便于采用电极损耗的补偿方法使型面精确成形。

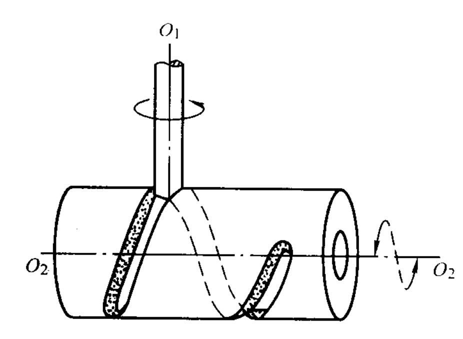


图 2.8-74　展成加工靠模螺旋槽

7）等速螺旋展成式　等速螺旋线（又称阿基米德螺旋线）型面在刀具和凸轮方面有很广泛的用途，展成回转式电火花加工很适宜于解决各种成形刀具和复杂刀具的等速螺旋型面加工问题，因此对于发展新型刀具和硬质合金刀具等非常有用，在许多场合它具有比磨削更高的工作效率，更广泛的适用面和更好的工艺效果。

图 2.8-75 是用成形旋转电极一次性展成弧面齿滚刀上整排齿背的等速螺旋线形面。由于滚刀的齿形沿弧面展布，虽然齿形轮廓相同，但齿顶切线角各不相同。采用机加工方法只能逐齿磨削。工件轴线还需要偏角分度装置，一般磨床不能适应，需要制造专门的精密复杂的分度夹具。单件制造滚刀，工具成本费大，加工操作技术要求也高。电火花加工则很方便，只需具备一片薄的样板梳刀（可用曲线磨或工具磨加工），数小时内即可加工完成全部齿型面。

图 2.8-76 是用圆柱形旋转电极加工空间等速螺旋面内凸轮，这种淬硬件内型腔面的精加工机械方法很难实现，展成式电火花精加工前工件内腔宜先粗制成形，可用立铣铣削成形后淬硬或用凸型空间等速螺旋面电极在电火花型腔加工



机床上预制孔穴。

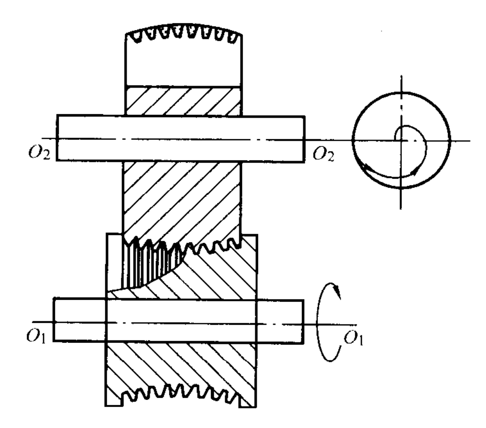


图 2.8-75 展成加工弧面齿滚刀

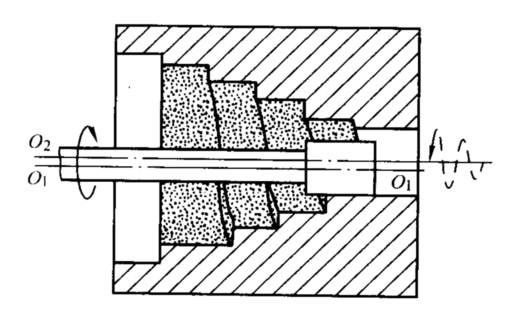


图 2.8-76 展成加工等速螺旋面内凸轮

8）坐标展成式 坐标展成属于展成回转式加工中机动灵活性最大的一种成形运动方式，形式很多，回转的工具电极以某种控制方式相对于工件按一定的坐标关系作展成运动实现加工。形状简单的轮廓可以利用机床原有进给机构的坐标读数装置人工控制转折点，一般情况下可以利用数控线切割机的控制系统。通常的数控系统是按直角坐标设计的，对于一些凸轮类等工件，采用以转角和径向进给的极坐标数控系统比较有利，既符合于工件轮廓的构成特点，又便于加工锥度面。对于个别特殊需要加工件，若不具备自动展成进给控制系统，也可以直接利用机床的读数装置，按分得足够细的对应坐标点，以人工进给控制，协调的动作，实现成形加工。

坐标展成回转式加工可以弥补线切割在某些方面的不足，常常适宜于在线切割或其他方法预加工后留少量余量作精加工。它的优点主要有两方面：一是可以明显地提高加工精度和表面质量；二是可以加工不贯通的型腔或外轮廓。由于采用回转形电极，运动精度可以很高，加工过程中还对电极本身作自修整形而达到很好的圆度（目前通用线切割机电极丝的运动精度受到导轮动态精度，本身在运动推进力、放电和工作液流作用力下产生的弦振以及金属丝截面尺寸的一致性偏差等影响较难提高到微米数量级）。这样，在工艺上就可以用轴向差动，补偿进给，重复走线（微量加工可解决生产率与表面粗糙度的矛盾和保持良好的排屑排气条件）等办法使电极损耗对加工精度的影响降低到可以忽略不计的程度，实现高精度和高表面质量的加工，如加工玻璃模、塑料模、金属压铸模、冷挤压模等。然而由于电极的直径尺寸远大于线切割金属丝，因此在加工内凹型轮廓方面不能适应于圆角半径小于电极半径的情况。

图 2.8-77 是采用圆柱形电极加工无间隙精冲模型腔。要求直壁，几何形状和轮廓尺寸精确，表面质量好，通常的电火花加工方法达不到如此高的要求。

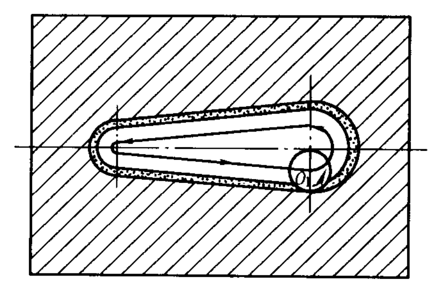


图 2.8-77 展成加工精冲模型腔

图 2.8-78 是采用圆柱形电极加工端面凸轮，可以得到过渡很匀滑，光洁度很高的曲面。可以采用极坐标系统，只需将径向与转角的坐标关系改换成轴向与转角的坐标关系进行数控，能够加工出由不同线型段组成的凸轮，电极直径可以取得与凸轮滚子直径相同。

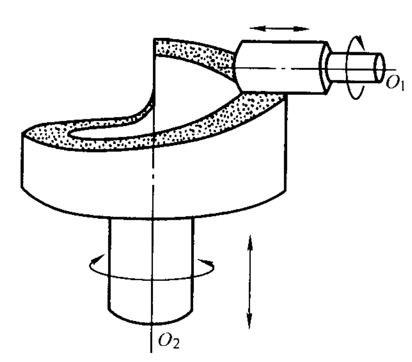


图 2.8-78 展成加工端面凸轮

3.3 回转式电火花加工的技术特点和适用面

（1）回转式电火花加工较机械磨削的特点

1）工件与工具电极间切向相对运动线速度的值可以很小，有时几乎接近于零。有些情况与磨削运动状态已有很大的不同，因此能取用一些通常磨削所不宜或不能直接采用的工作方式，如共轭回转式等。

2）加工部位不产生明显的机械作用力，能够适应微小型和带有小尺寸工件的加工。与第一点结合起来，有利于设计制造出运动精度很高的机床，并得到很高的加工工艺指标。

3）工具电极特别是成形电极比砂轮制造方便，容易整修。同一工具电极既可完成粗加工，也可完成精加工。因此有些场合易于机动灵活地发挥加工能力，工作效率能比磨削有大幅度的提高，如用石墨电极加工成形刀具。

4）通常在同一台回转式电火花加工机床上能加工多种类型很不相同的精密型面和工件（磨床难做到）。

缺点是一般加工情况下工具电极与砂轮相比的相对损耗较大，需要采取一些辅助工艺措施予以解决。

（2）回转式电火花加工较其他常见电火花加工类型的特点

回转式电火花加工由于具有多种有利的技术条件，能够较好地发挥电火花加工的特点，因而成为实现精加工比较理想的加工方式，它所能达到的工艺质量指标，在各类加工中居于最高。例如对于同一台加工电源设备，配用在回转式加工机床上，能够达到的加工表面粗糙度会比配用在其他类型的机床上低得多（并不能取代其他类加工）。它的主要技术特点如下。

1）由于回转运动造成的液流扰动和适宜的加工布局，使得狭长的加工区域附近具有足够的空间，可以做到在加工

过程中始终保持加工区域具有良好的排屑、排气条件。这一点对得到高的加工精度和表面质量非常重要，这样能够比较彻底地避免通常电火花加工类型中由于存在排屑、排气不良产生二次放电而形成锥度等偏差以及造成工具电极各部分相对损耗不一致而影响加工精度。另外，也几乎不会因排屑、排气不良而产生拉电弧烧伤工件的现象。

2）具有许多种成形运动方式，选用合理的运动方式，可使型面得到精确成形。对于一些如齿轮或泵体转子等工件，组配对合加工后，能够具有极好的传动啮合性能。某些情况下还可消除工具电极本身的微量制造偏差，利用运转和加工进给时对应部位存在的微量滑移差动，使得被加工件的表面粗糙度可以远比工具电极对应工作面的粗糙度低，如工具电极表面 $R_a = 2.5\ \mu m$，使工件表面加工至 $R_a < 0.16\ \mu m$。这在其他类型的电火花加工中通常是较难做到的。

3）可以而且已经设计制造出多种运动精度很高的实用设备，同一台设备可以完成多种类型很不相同的工件的加工。如精密螺纹、齿轮和复杂型面刀具等。

4）可以在极小的放电间隙下进行正常的加工，减小包络线成形偏差影响，利用逼近法实现如渐开线，摆线型和螺旋面等复杂型面的精密加工。

5）便于对工具电极的损耗采取多种有效的精确补偿措施。

6）加工时属于窄区放电的情况较多，极间电容的影响可以忽略不计，能够利用很小的单个脉冲放电能量顺利地进行精加工和超精加工。

7）可以实现电规准的连续转换和加工尺寸的连续进给，使精加工余量减至最小的限度，对提高平均电蚀生产率和加工效率有很大好处。

缺点是在窄区放电的情况下，对应加工面积较小，对于同一粗或中加工电规准，用于回转式加工的电蚀生产率没有穿孔和型腔类对较大面积进行加工时高。

（3）适用面

双轴共轭回转式和展成回转式电火花加工能用于加工：圆柱面、圆锥面、球面、旋转曲面、平面、棱柱面、棱锥面和由渐开线、摆线、螺旋线、等速螺旋线、二次曲线等组成的复杂型面，或者是单一的一种型面，或者是几种型面的结合，使得这些型面精确成形并具有良好的啮合性能。特别适宜于硬质合金、不锈钢和淬硬钢等难加工材料的加工，能实现许多类型机械加工或其他方法难以解决的特殊精密加工。成形和尺寸精度常常能达到微米数量级，表面粗糙度 R_a 一般能达到 $0.32 \sim 0.04\ \mu m$，并能实现电火花镜面加工。

回转式电火花加工特别适用于电蚀除去量不大的精密加工场合，尤其对于一些小型精密工件的加工，生产效率相对来说常常比机械磨削或切削高，也容易达到高精度。磨削或切削因受零件热变形、弹性、塑性和装夹变形等因素影响，切削用量只能选择得很小，成形精度也往往受到限制。当然，对于一般常规类型的加工，机械方法和设备已经发展得比较成熟、完善，通常不宜用电火花加工去取代。况且电火花加工的工具电极本身常常需要依赖机械加工方法制造，两者有相辅相成的关系。

3.4 实现精密级电火花加工的技术条件

要使电火花加工的工件的几何精度和尺寸精度均达到微米数量级，而且表面粗糙度 R_a 直接加工至 $0.32 \sim 0.04\ \mu m$ 范围内，需要同时满足成形运动，电极及损耗，电参数选择和排屑排气四个方面的技术条件，可以用系统工程的观点去逐个分析和建立一个条件体系。

图2.8-79中，为了形象直观地反映各技术条件间的相互关系，主项与分项的关系，必要条件和选择性条件的区别，借用了逻辑门电路图表示。图中圆缺形为“与门”，三角形为“或门”，圆缺加三角形为“与或门”。

按照图示思路对某种加工方式对照条件逐项进行分析很容易判断出：能否实现精密加工；根据已有技术基础，实现精密加工尚需解决哪些问题；实现精密加工的难易程度；不能达到精密加工目的的问题所在等。当然，此图仅揭示了某些技术条件的名称，实际上每项条件所包含的具体内容是很丰富的。例如，动态精度一项，对于不同的工件类型，加工精度要求和采用的成形运动方式均可提出一组相应的技术要求数据。

（1）成形运动

采用何种成形运动方式至关重要。可以说常常是决定能否实现精密加工的前提。设计安排新的成形运动方式，当前还富有创造潜力。对于回转式加工复杂型面的成形运动，要特别注意成形过程中的运动干涉问题，在无法回避的情况下，要能采取技术措施，把所产生的干涉量控制在工件精度的允许范围内。选用了合适的成形运动方式后，技术上难度较大的一个问题是要保证运动机构的动态精度。工件的加工精度要达到微米级，对各项运动精度均需有相应的要求，一般应比工件精度指标更高。如在共轭回转式加工状态下主要是控制径向跳动、轴向窜动、转角差和振动四项指标，其中转角差一项要特别予以注意。

要使工件得到好的表面粗糙度同时又有高的几何精度，工件和工具电极相对加工部位表面沿切向应有一定量滑移差动。这样，可把工件的成形精度提高到机构本身运动精度的等级，能消除某些电极制造偏差，并使电极表面的微量凸起或缺陷不会明显地反映到工件上。从一定程度上说，设置恰当的滑移差动量是实现电火花精密加工的必要条件。

（2）电极及损耗

习惯倾向于致力降低电极损耗以保证和提高电火花加工精度，这在一定范围内是可取的。如果企求以此作为惟一途径去达到微米级精度的加工，那就不大现实了。一则目前电极低损耗只能在粗、中加工时实现，在这一范围电规准下加工面的粗糙度不能用来反映微米级的加工精度，也不能同时得到好的粗糙度表面。二则把电极损耗产生的各部分尺寸变化程度控制到微米极，从当前技术发展现状中还看不出有多大希望。

回转式加工中采用多种电极损耗补偿的办法以达到精密加工的目的。如共轭回转式加工精密螺纹的工艺过程中采用分段移位定量进给逐步逼近法可做到不论工具电极相对损耗多大，总有办法使工件螺纹成形精度和中径尺寸偏差达到微米级，因而实际生产中能用相对损耗很大的黄铜电极加工出硬质合金精密螺纹件。当然，采用各种精确补偿方法时，常常需要分别建立一套工艺分析计算式和培养熟练的操作技巧。

对于回转式电火花精密加工来说，工具电极存在损耗往往对达到加工精度有利，工艺上常常可利用电极损耗特性以降低电极制造要求，借机械高的运动精度使电极在加工过程中得到自修整，某些情况下还可以降低对机床动态精度的要求，并便于掌握加工件尺寸精度。完全无损耗的电极不一定实用，它的局部缺陷或表面疵病会较明显地直接反映到工件上，或由于局部凸起等缺陷影响正常加工进给而使加工效率大为降低。

（3）电参数选择

实现精密加工的一般工艺安排是先用粗规准加工成形，再以中规准除去工件表面较厚的变质层改善粗糙程度，然后用精规准修去尽可能小的加工余量并同时得到好的粗糙度表面。

电参数的配置要求能逐级分挡或以连续转换方式压缩单脉冲能量直到满足精密加工要求，但往往容易忽视所用精规准电参数与其他加工条件的关系。需要特别注意如下两点。

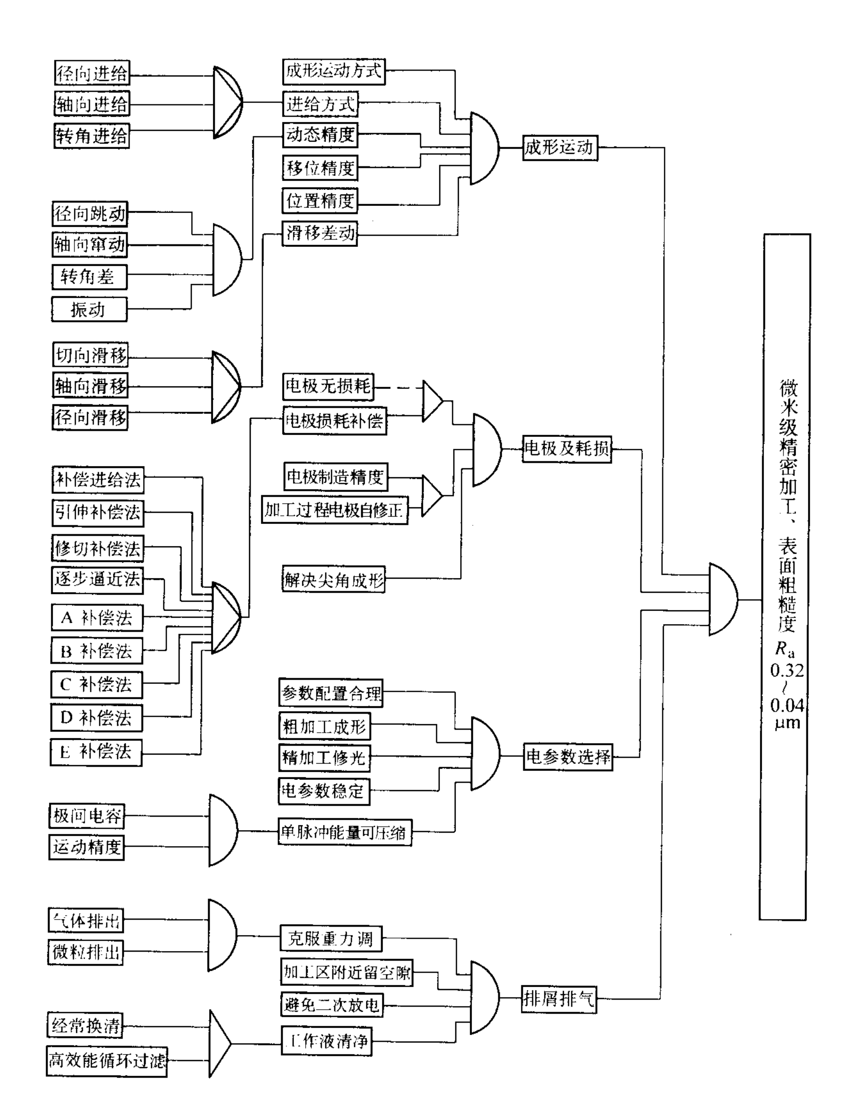


图 2.8-79　电火花精密加工技术条件图示

1）极间电容的影响　极间电容会限制单脉冲能量的可压缩范围。在型腔加工中比较突出，如果工具电极与工件对应加工面积较大，有些情况下会使精密加工无法实现。

2）电参数与运动精度的关系　一般认为能否加工得到低表面粗糙度值只决定于选用的电参数。然而这仅仅是一个必要条件，许多加工场合下还与工具电极相对于工件的运动精度密切相关。因为精规准的放电间隙较小，若动态精度差，间隙的运动变化量已接近放电间隙值，有的甚至已超出放电间隙值，则会使加工效率降得很低，直至无法进行加工。

（4）排屑排气

深或大面积型腔加工场合下排屑排气状况往往很差，电蚀产物排出途径较长，有些部位排出时要几经转折，产生多次放电影响加工精度。弱规准加工时放电产生的气体和液流运动的排出力量较小，有的部分容易造成微粒堆积，清净工作液很难随时补充到整个加工区域，供液不足的部位会大量产生气体放电或电弧放电等，成为实现精密加工的障碍。线切割厚工件时也会遇到排屑条件差影响加工精度的问题，当然采用多次走线切割法能予以解决，但往往受重复运动精度及工作效率大为降低等条件的牵制。本节列举的各种回转式电火花加工成形运动方式中，均可做到保证从加工开始一直到精加工结束，加工区域附近始终留有足够的排屑排气空间，使加工能稳定顺利地进行，电蚀微粒产生多次放电的可能性也很小，可以完全不影响工件的精确成形和表面质量。

仔细研究图 2.8-79 所示的各项技术条件可以看出，回转式加工能比较容易地同时满足各项技术条件实现精密加工，而通常的成形加工由于成形运动方式单一，电极的制造精密和损耗等方面的问题不易同时解决好，因此大多数情况下很难实现微米级精度加工。

3.5　回转式电火花加工典型工艺实例分析

用回转式电火花加工某些复杂型面时需要先进工艺分析，才能设计制造出合适的工具电极，制订出相应的工艺操作程序，下面以加工精密螺纹的工艺分析为例，其他类加工的工艺分析可以它为借鉴。同步、倍角共轭回转、行星共轭式和共轭回摆式加工螺纹时均可用轴向分段移位径向定量进给逐步逼近法解决电极损耗补偿问题，其过程示意见图 2.8-80。当轴向相对位置固定，以径向进给实现电火花加工时，放电区域集中于螺纹电极和工件相切接线附近一个狭窄区域内。所以研究螺纹牙型成形过程比较简明的方法是分析通过螺纹电极轴线和工件轴线，从而也就包括了电极与工件相切接线在内的剖切平面上牙型的成形情况。



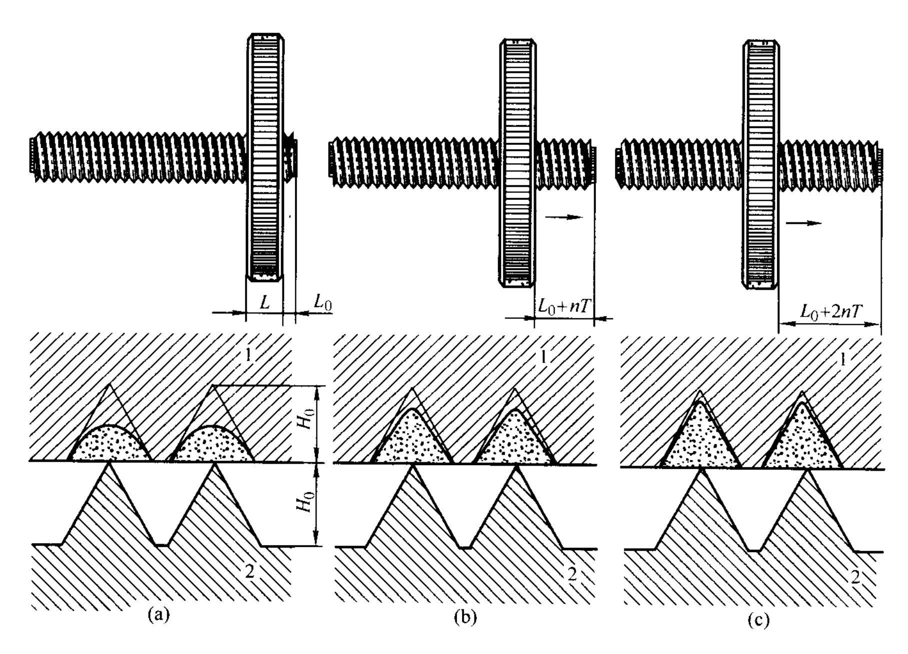


图 2.8-80　轴向分段移位径向定量进给逼近加工

(1) 牙底深度成形计算

电火花加工时不可避免地会存在电极损耗，直接影响到加工所能达到的牙底深度，因而要定量研究被加工螺纹牙底深度的成形。

图 2.8-80 中设螺纹电极原始牙形高度为 H_0，并且电极径向进给深度每次均固定为 H_0。经第一次加工电极牙形受蚀损后牙高为 H_1，经第二次整修加工电极牙形受蚀损后牙高为 H_2，经第 n 次整修加工电极牙形受蚀损后牙高为 H_n。

从图中可见，随着整修加工次数增多，由于电火花加工的精确仿形性，用分段移位径向定量进给逐步逼近法，可在工件上得到精确螺纹牙型。

这里引入一个重要概念，即螺纹电极牙顶高度相对损耗值 η，它的含义是螺纹电极在一次进给加工过程中牙顶高度蚀损量与总进给量之比。由于在同步回转式等排屑排气条件始终良好的加工情况下容易把它控制成一个比较稳定的数值，而且便于直接测量，所以实际生产中这个 η 值很有用处。

设第一次加工中螺纹电极牙顶高度相对损耗值为 η_1，则：

$$\eta_1=\frac{H_0-H_1}{H_0}$$

第二次整修加工中电极牙高相对损耗值为 η_2，则：

$$\eta_2=\frac{H_0-H_2}{H_0-H_1}$$

因为整修是在第一次加工基础上进行，所以虽然径向位移进给量仍为 H_0（即最终读数刻度指示值相同），但实际产生火花放电加工的总进给量为 H_0-H_1。

第 n 次整修加工中电极牙高相对损耗值为 η_n，则：

$$\eta_n=\frac{H_0-H_n}{H_0-H_{n-1}}$$

以上各式左右相乘化简得：

$$\frac{H_0-H_n}{H_0}=\eta_1\eta_2\cdots\eta_n \tag{2.8-1}$$

实际加工中，可以设法做到使各次电极牙高相对损耗值近似相等，这样：

$$\frac{H_0-H_n}{H_0}=\eta^n \tag{2.8-2}$$

$\frac{H_0-H_n}{H_0}$ 即是经过第 n 次整修加工后的电极牙高损耗值与原始牙高的比值，这个值决定了工件加工出的螺纹牙底深度，相应地也就在很大程度上决定了螺纹牙型的几何精度和尺寸精度。

按照上面推导出的计算式，表 2.8-5 中列出了部分理论计算值供实际加工和作分析研究参考。为了加强直观性和便于比较，还可按表中数据绘制成图 2.8-81 所示折线。

表 2.8-5　牙底深度成形计算值

电极牙顶高度相对损耗 η/%	原始牙高 H_0/mm	各次整修加工后电极牙高与原始牙高的比值/%							
		一次加工后 $\frac{H_0-H_1}{H_0}$	二次加工后 $\frac{H_0-H_2}{H_0}$	三次加工后 $\frac{H_0-H_3}{H_0}$	四次加工后 $\frac{H_0-H_4}{H_0}$	五次加工后 $\frac{H_0-H_5}{H_0}$	六次加工后 $\frac{H_0-H_6}{H_0}$	七次加工后 $\frac{H_0-H_7}{H_0}$	八次加工后 $\frac{H_0-H_8}{H_0}$
70	100	70	49	34	24	17	12	8.2	5.8
60	100	60	36	22	13	7.8	4.7	2.8	1.7
50	100	50	25	13	6.3	3.1	1.5	0.75	0.38
40	100	40	16	6.4	3.8	1.5	0.6	0.24	0.1
30	100	30	9	2.7	0.8	0.24	0.07	0.02	0.006
20	100	20	4	0.8	0.16	0.03	0.006	0.001	0.000 2
10	100	10	1	0.1	0.01	0.001	0.000 1	0.000 01	0.000 001



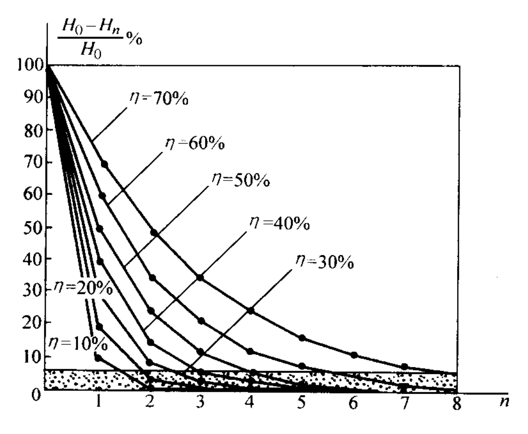


图 2.8-81 牙底深度成形比较

通常对于螺纹加工，$\frac{H_0-H_n}{H_0}$值在6%以下时，即折线图中相应于细点标出的区域，就可得到合乎要求的牙形（考虑了电极牙顶尖损耗所形成的圆角变形部分），因为普通螺纹技术标准中规定螺纹牙型槽底可以呈圆弧形，相配螺纹牙顶则截短$\frac{H_0}{8}$，而一般螺纹电极制造时可采用尖角牙顶牙型，这样可弥补电极损耗对加工精度的影响，有利于螺纹牙底成形，把实际上不能完全消除的电极牙顶损耗部分压缩在螺纹允许截去的牙型尖角范围内，亦即在螺纹工作面以外。

从表 2.8-5 中可看出，减小 η 值有很大的好处，可以显著减少加工次数，因为螺纹电极牙高损耗值与原始牙高的比值$\frac{H_0-H_n}{H_0}$等于 η 的 n 次乘方。例如，当 $\eta=40\%$时，需要加工八次才能达到相应的牙底深度，当 $\eta=10\%$时，只要加工三次就能达到同样的牙底深度。从理论上说不论电极相对损耗值多大，采用“分段移位径向定量进给逐步逼近法”，只要分段进给次数足够，总能逐步加工形成精确螺纹牙型。

当然实际生产中也不宜使分段定量进给次数过多，否则对机床轴向行程要求较大，而且电极制造长度亦要增加，还会降低工作效率。一般加工精密内螺纹，分段进给次数常在六次左右，并能在电极一次装夹状况下实现。

有时为了工艺上需要，分段定量进给加工过程中要改变几次电规准，而与不同电规准相对应的 η 值一般不会相等，此时$\frac{H_0-H_n}{H_0}$值就要采用式（2.8-1）以几个不同 η 值代入进行计算。

（2）径向进给牙型角度成形计算

螺纹加工技术条件中除了牙底深度外，牙型角度亦是一个很重要技术指标。特别对于加工精密螺纹，牙型半角公差要求较高。

图 2.8-82 中设电极原始牙顶角为 α_0，一般螺纹采用半角对称牙型，设底角为 θ_0。经第一次加工电极受损耗后底角为 θ_1，顶角为 α_1。经第 n 次整修加工后底角为 θ_n，顶角为 α_n。随着整修次数增多，底角 θ_n 愈来愈接受θ_0，顶角 α_n 愈来愈接近于α_0。假定电极牙顶尖部分加工后仍为尖角形，实际上由于“尖角效应”等原因它将为圆弧形。但为了分析方便，这样假定并不会影响计算结果。加工过程中使 η 为定值，这样选择能保持电极损耗与进给深度成线性关系，直线牙型受加工损耗后仍为直线型，顶角 α 是牙型基本轮廓线的交角。

设各次加工过程中电极牙高相对损耗值分别为 η_1、η_2、…、η_n，则按 η_1、η_2、…、η_n 照 η 的定义，经第一次加工后电极损耗高度为 $\eta_1 H_0$，牙型存留高度为：

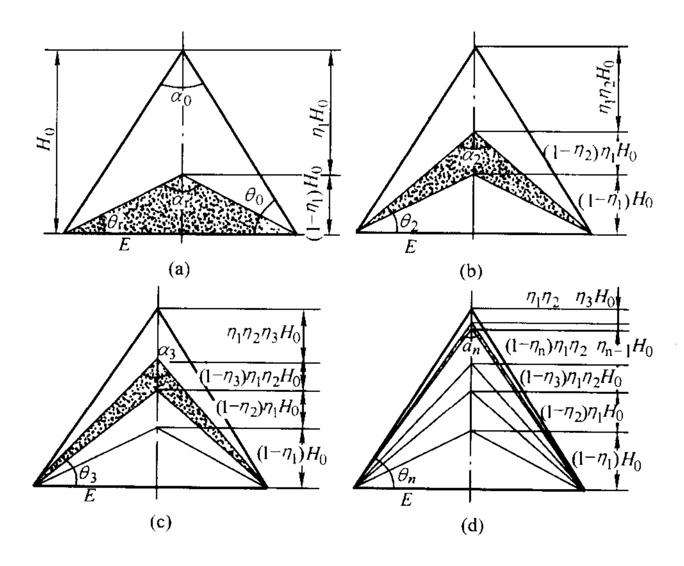


图 2.8-82 牙型角度成形计算

$$H_0-\eta_1 H_0=(1-\eta_1)H_0$$

亦即为工件上电蚀形成的牙型深度。

第二次整修加工时实际产生火花放电加工的总进给量为 $\eta_1 H_0$，电极损耗高度为 $\eta_1\eta_2 H_0$，蚀除工件深度为：

$$\eta_1 H_0-\eta_1\eta_2 H_0=(1-\eta_2)\eta_1 H_0$$

同理推得第 n 次整修加工时实际产生火花放电加工的总进给量为 $\eta_1\eta_1\cdots\eta_{n-1}H_0$，电极损耗高度为 $\eta_1\eta_2\cdots\eta_n H_0$，蚀除工件深度为：

$$\eta_1\eta_1\cdots\eta_{n-1}H_0-\eta_1\eta_2\cdots\eta_n H_0=(1-\eta_2)\eta_1\eta_2\cdots\eta_{n-1}H_0$$

第一次加工后

$$\tan\theta_1=\frac{(1-\eta_1)H_0}{E}=(1-\eta_1)\tan\theta_0$$

第 n 次加工后

$$\begin{aligned}\tan\theta_n&=[(1-\eta_1)H_0+(1-\eta_2)\eta_1 H_0+(1-\eta_3)\eta_1\eta_2 H_0+\\&\quad\cdots+(1-\eta_n)\eta_1\eta_2\cdots\eta_{n-1}H_0]/E\\&=[(1-\eta_1)+(1-\eta_2)\eta_1+(1-\eta_3)\eta_1\eta_2\\&\quad+\cdots+(1-\eta_n)\eta_1\eta_2\cdots\eta_{n-1}]\tan\theta_0\end{aligned}\qquad(2.8\text{-}3)$$

实际加工中使各次 η 值相等，则式（2.8-3）成为

$$\tan\theta_n=(1-\eta)(1+\eta+\eta^2+\cdots+\eta^{n-1})\tan\theta_0=(1-\eta^n)\tan\theta_0\qquad(2.8\text{-}4)$$

牙顶角则为：$\alpha_n=\pi-2\theta_n$ （2.8-5）

计算结果表明，θ_0 和 η 值固定后 α_n 仅与加工次数有关，定量进给情况下与进给量大小无关。亦即加工不同螺距螺纹时虽然进给深度不同，但只要加工相同次数，所形成的牙型角相同。这给实用工艺提供了很大方便。

下面通过表 2.8-6 中二组数字计算实例进行具体研究。

从表中可见，若取用 $\alpha_0=60°$牙顶角螺纹电极加工 60°牙型角普通螺纹，或用 30°牙顶角螺纹电极加工 30°牙型角梯形螺纹，当加工整修次数逐渐增多，工件上牙型角逐步逼近于电极牙型角，但其牙顶角 α_n 总是稍大于电极原始牙项角α_0。从式（2.8-4）和式（2.8-5）中亦可看出 $1-\eta^n$ 值总是小于1，所以 $\theta_n<\theta_0$，而 $\alpha_0<\alpha_n$。因此，用与工件所要求牙型角相等的螺纹电极加工精密螺纹不太适宜。

为了减少进给次数和提高加工精度，可使 α_0 略小于工件所要求的牙型角。通过一定次数加工，使 α_n 刚好等于标准值或带有允许的角度负偏差。此时为了确定 α_0，可把式（2.8-4）和式（2.8-5）换写成：

$$\tan\theta_0=\frac{\tan\theta_n}{1-\eta^n}$$

表 2.8-6 牙型角度成形计算

设 $\alpha_0 = 60°$ $\eta = 50\%$ 则 $\theta_0 = 60°$ $\tan\theta_0 = 1.7321$			设 $\alpha_0 = 30°$ $\eta = 50\%$ 则 $\theta_0 = 70°$ $\tan\theta_0 = 3.7321$		
$\tan\theta_1 = 0.8661$	$\theta_1 = 40°54'$	$\alpha_1 = 98°12'$	$\tan\theta_1 = 1.8661$	$\theta_1 = 61°49'$	$\alpha_1 = 56°22'$
$\tan\theta_2 = 1.2891$	$\theta_2 = 52°12'$	$\alpha_2 = 75°36'$	$\tan\theta_2 = 2.7991$	$\theta_2 = 70°20'$	$\alpha_2 = 39°20'$
$\tan\theta_3 = 1.5156$	$\theta_3 = 56°35'$	$\alpha_3 = 66°50'$	$\tan\theta_3 = 3.2656$	$\theta_3 = 72°58'$	$\alpha_3 = 34°4'$
$\tan\theta_4 = 1.6238$	$\theta_4 = 58°22'$	$\alpha_4 = 63°16'$	$\tan\theta_4 = 3.4988$	$\theta_4 = 74°3'$	$\alpha_4 = 31°54'$
$\tan\theta_5 = 1.6779$	$\theta_5 = 59°12'$	$\alpha_5 = °1'36$	$\tan\theta_5 = 3.6153$	$\theta_5 = 74°32'$	$\alpha_5 = 30°56'$
$\tan\theta_6 = 1.7079$	$\theta_6 = 59°36'$	$\alpha_6 = 60°48'$	$\tan\theta_6 = 3.6735$	$\theta_6 = 74°46'$	$\alpha_6 = 30°28'$
$\tan\theta_7 = 1.7184$	$\theta_7 = 59°48'$	$\alpha_7 = 60°24'$	$\tan\theta_7 = 3.7026$	$\theta_7 = 74°53'$	$\alpha_7 = 30°14'$
$\tan\theta_8 = 1.7252$	$\theta_8 = 59°54'$	$\alpha_8 = 60°12'$	$\tan\theta_8 = 3.7172$	$\theta_8 = 74°56'$	$\alpha_8 = 30°8'$

$$\alpha_0 = \pi - 2\theta_0$$

加工次数则需要与牙底深度加工要求结合起来共同确定，通常是以能保证足够牙底深度所要求的加工次数为依据，再计算电极原始牙顶角 α_0。

例 1 设加工普通公制螺纹 $\alpha_n = 60°$，$\eta = 50\%$，取 $n = 6$

则
$$\theta_n = \frac{\pi - \alpha_n}{2} = 60°$$

$$\tan\theta_0 = \frac{\tan\theta_n}{1 - \eta^6} = \frac{\tan 60°}{1 - (0.5)^6} = 1.7595$$

$$\theta_0 = 60°23.5'$$

$$\alpha_0 = \pi - 2\theta_0 = 59°13'$$

从实际生产情况看，α_0 比工件牙型角减少范围在 50′以内较好。若两者相差太大，由于加工过程中其他各种不稳定因素影响，可能使工件牙型角超差。

从保证较有把握达到牙型角加工精度的观点考虑，可增加分段定量进给次数提高牙型角的逐步逼近程度，亦即使电极原始牙型角可取得较接近于工件牙型角。这样，就能减少加工中由于 η 值稍有变化及其他某些偏差因素对加工精度的影响。表 2.8-7 中几组典型数据可供分析计算参考，如表中 $\theta_n = 60°$，η 值在 0.4～0.6 范围内变化，当 n 取 6 次，α_0 变动范围为 2°8′。当 n 取 8 次，α_0 变动范围缩小为 48′。而 α_0 变动范围愈大，则说明 η 值变化对牙型角产生的偏差影响亦愈大。这也从另一个方面证实了取用较多分段定量进给次数可提高工件牙型角成形精度。

表 2.8-7 不同情况电极牙型角度选择

规格	n	1	2	3	4	5	6	7	8
普通螺纹 $\alpha_n = 60°$时 α_0 的值	0.7	19°40′	32°48′	40°32′	47°22′	51°20′	54°	55°50′	57°4′
	0.6	28°	40°34′	49°42′	53°22′	56°4′	57°40′	58°36′	59°10′
	0.5	32°12′	46°18′	53°36′	56°52′	58°26′	59°13′	59°36′	59°48′
	0.4	38°12′	51°44′	56°46′	58°44′	59°28′	59°48′	59°56′	59°58′
	0.3	44°2′	55°26′	58°40′	59°36′	59°52′	59°58′	60°	60°
	0.2	49°35′	58°	59°36′	59°56′	59°59′	60°	60°	60°
	0.1	54°58′	59°28′	59°56′	60°	60°	60°	60°	60°
梯形螺纹 $\alpha_n = 30°$时 α_0 的值	0.7	9°48′	15°34′	19°58′	23°	25°8′	26°36′	27°38′	28°22′
	0.6	12°14′	19°28′	23°44′	26°14′	27°44′	28°40′	29°12′	29°23′
	0.5	15°16′	22°44′	25°52′	28°12′	29°6′	29°34′	29°46′	29°52′
	0.4	18°8′	25°22′	28°2′	29°16′	29°43′	29°53′	29°57′	29°59′
	0.3	21°15′	27°28′	29°13′	29°46′	29°56′	29°59′	30°	30°
	0.2	24°12′	28°51′	29°46′	29°57′	29°59′	30°	30°	30°
	0.1	27°8′	29°43′	29°58′	30°	30°	30°	30°	30°

(3) 螺纹牙型干涉一般分析

共轭式电火花加工螺纹时，由于螺纹电极的直径与工件对应加工直径不相等，或两者回转方向组配不当等原因，都会在加工过程中产生螺纹牙型干涉，影响工件螺纹的成形精度。有些情况稍加注意，采取适当工艺措施就能克服其不良影响。有些情况则必须通过分析计算，采取严密的工艺措施才能加工出精密螺纹。由于螺纹形状的空间构成形式，分析牙型干涉现象比较复杂，但也不难理解。要做到能在各种不同条件下对特定加工件有充分把握使干涉影响减小到所允许的程度，又不过分苛求，以得到合理的技术经济效果，就必须了解和掌握其定性和定量的分析方法。

图 2.8-83a 中设以 O_2 为圆心的圆周代表螺纹电极，外径为 D_2，螺距为 T_0。以 O_1 为圆心的圆周代表工件内螺纹，外径为 D_1，若按同步共轭式加工，由于其成形特点和工件螺距等于电极螺距。对于三角牙型螺纹，通常只需观察螺纹电极牙顶角顶点，亦即外径上的点径向进给过程中除了 P_2



点与工件 P_1 点相切处附近产生火花放电外，其他位置是否存在影响牙型成形精度的多余放电区域，就可判别出有没有产生螺纹牙型干涉。或者用另一种方式判别，即假定以 O_1 为中心的工件上已经有标准内螺纹，而以 O_2 为中心的螺纹电极上保持着完整螺纹牙型，使电极向工件作径向进给。若电极上 P_2 点与工作上对应点 P_1 能切合而不受其他部位阻挡，那么就不产生干涉。如果受到阻挡就存在干涉。

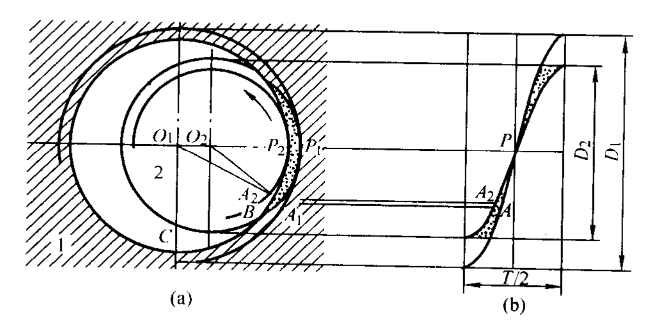


图 2.8-83　螺纹干涉分析

图 2.8-83b 是螺纹电极牙顶尖螺旋线（设电极采用尖角牙形）在平行于本身轴线平面上的投影，以及由于同步共轭式加工使工件上形成的内螺纹牙底角底尖螺旋线在同一平面上的投影。从图中可看出几个特点。

1）因采取径向进给方式，显然两条正弦曲线 P_1 与 P_2 点投影重合于 P 点。若不存在干涉，火花放电应仅在 P 点附近很小区域产生。

2）由于同向同步共轭式加工，工件上形成与电极螺距相一致而旋向也与电极螺纹相同的内螺纹，两条正弦曲线半个周期都相对应于横轴上伸展 $\frac{T}{2}$ 的长度。

3）由于螺纹电极外径与工件螺纹外径不等，两条正弦曲线幅值不同。螺纹电极等于 $\frac{D_2}{2}$。工件等于 $\frac{D_1}{2}$。两者螺旋升角不相同：

电极螺旋升角　$W_2 = \arctan\frac{T}{\pi D_2}$　(2.8-6)

工件螺旋升角　$W_1 = \arctan\frac{T}{\pi D_1}$　(2.8-7)

4）观察 P 点以外情况，如电极外径上 A_2 点和工件上与它邻近的 A_1 点。此外电极牙顶尖与工件螺纹外径已分离开一定距离，设以 h 表示（见图 2.8-84）。随着偏离 P 点的转角愈大，电极外径上的点与工件螺纹外径上的邻近点分离得愈开。若电极与工件螺纹升角相等，则这种情况下不论什么部位均不会出现螺纹干涉。当两者螺旋升角不同，随着偏离 P 点的转角增大，见图 2.8-84b，电极牙顶尖与工件牙底尖产生愈来愈大的轴向偏差 ΔT（注意投影曲线上 A_2 点与 A_1 点并不处于同一水平高度，所以 ΔT 不能以两条曲线分离的水平直线距离表示）。因此，是否产生螺纹干涉由这两种趋向的相对大小决定。图 2.8-84a 中，

$$\frac{\Delta T}{h} = \tan\frac{\alpha}{2} < \tan\frac{\alpha_0}{2} \text{即} \alpha < \alpha_0$$

是不产生螺纹干涉情况。而图 2.8-84b 中，

$$\frac{\Delta T}{h} = \tan\frac{\alpha}{2} > \tan\frac{\alpha_0}{2} \text{即} \alpha > \alpha_0$$

此时产生螺纹干涉。干涉分析中称 $\frac{\alpha}{2}$ 为偏移错位角。

因螺纹结构形式呈现连续性，所以判断螺纹干涉情况，应考察自 P 点开始以工件轴心 O_1 为中心向任何方向转过一定角度的整个范围内所有点，而不能仅仅局限于少数个别

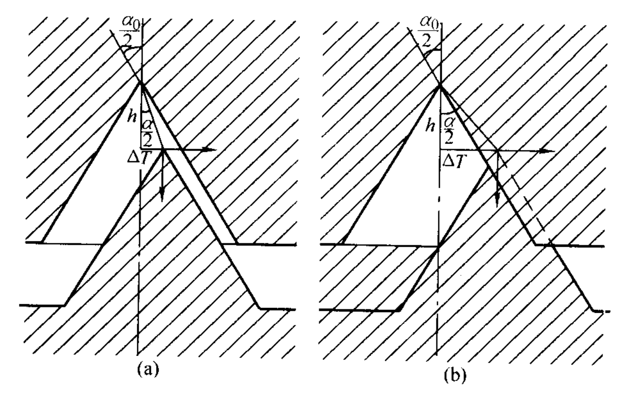


图 2.8-84　螺纹干涉判别

点，当然从电极外径已经越出工件内径的 BC 段范围，两者牙型已完全脱离，不可能产生螺纹干涉，图 2.8-83 和图 2.8-85 中可能产生干涉的区域已用细点标出。

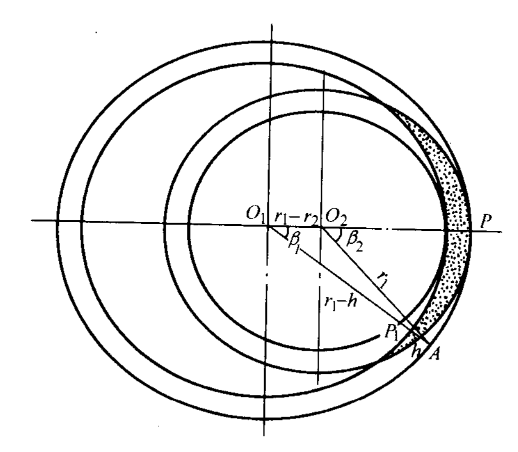


图 2.8-85　螺纹干涉计算

研究螺纹电极外径上的 P_1 点，$O_2P_1 = r_2$。此时 O_2P_1 离开切点 P 的转角设为 β_2，作 O_1P_1 连线并延长与工件螺纹外径相交于 A 点，$P_1A = h$，用于近似表示电极牙顶尖与工件邻近点牙底尖分离的最近距离。因 $O_1A = r_1$，所以 $O_1P_1 = r_1 - h$，此时 O_1P_1 离开相切点 P 的转角设为 β_1。同向同步回转条件下加工，工件与电极上螺纹旋向相同。

对于 P_1 点，按余弦定律可求出转角差：

$$\beta_2 - \beta_1 = \arccos\frac{2r_1(r_2 - h) + h^2}{2r_2(r_1 - h)} \quad (2.8\text{-}8)$$

同步内接式加工条件下，转角为 $\beta_2 - \beta_1$ 时 P_1 点的轴向偏移差：

$$\Delta T = \frac{\beta_2 - \beta_1}{2\pi}T = \frac{T}{2\pi}\arccos\frac{2r_1(r_2 - h) + h^2}{2r_2(r_1 - h)} \quad (2.8\text{-}9)$$

偏移错位角

$$\frac{\alpha}{2} = \arctan\frac{\Delta T}{h} = \arctan\left[\arccos\frac{2r_1(r_2 - h) + h^2}{2r_2(r_1 - h)}\right] \quad (2.8\text{-}10)$$

由以上各式可见：

1）$\alpha > \alpha_0$ 的所有各个点都有可能产生螺纹干涉，但并不是在所有满足 $\alpha > \alpha_0$ 的所有点同时产生，而 $\alpha < \alpha_0$ 的所有点都不受干涉；

2）当 $r_1 = r_2$ 时，h 为零，成为螺纹紧密旋配，由式 (2.8-9) 可知，此时 $\beta_2 - \beta_1 = 0$。

(4) 同步内接式干涉计算

同步内接式干涉计算适用于工件与螺纹电极保持等角对应关系，以内接回转式加工内螺纹工件的各种情况，其中包

括同步共轭回转式、行星共轭式和共轭回摆式中的类似同步运转工作状态。

图 2.8-85 中以 O_2 为中心、r_2 为半径的圆是螺纹电极牙顶尖螺旋线轴向投影，以 O_1 为中心、r_1 为半径的外圆是工件螺纹牙底尖螺旋线轴向投影，内圆是工件螺纹内径投影。电极外径与工件外径相切于 P 点。所以偏移差 $\Delta T=0$。

偏移错位角 $\frac{\alpha}{2}$ 与 T、r_2、r_1 以及 h 值有关。改变其中任何一个量都会影响偏移错位角大小。

一般实际生产中 T 和 r_1 是已定的，当选定 r_2 后为了判断加工时是否会产生螺纹干涉现象，可以绘制图 2.8-86 所示干涉曲线直观判别。干涉曲线图上纵坐标为 h，横坐标为 ΔT。粗黑线是所需加工的螺纹牙型轮廓线界面，或称为假想牙型轮廓界面线，并把牙型截短部分补成完整尖角形以便于分析。自三角牙型顶点开始向下弯垂的曲线是电极牙顶尖相对于其邻近工件上对应点的分离和偏移轨迹线。因此，曲线上每一点横坐标相当于该点分离值为 h 的电极牙顶尖与工件牙底尖轴向偏移差大小，而牙型顶点就相当于图 2.8-85 上 P 点位置。

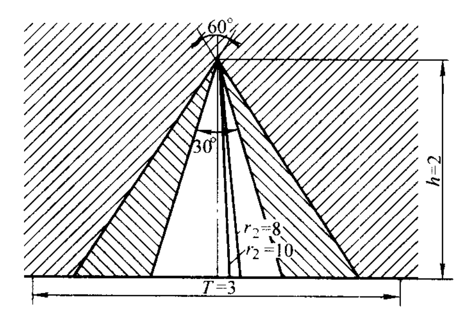


图 2.8-86　螺纹干涉曲线

若曲线全部被限制于牙型轮廓界面内，则不存在干涉现象。若曲线有部分越出牙型轮廓界面线，则这部分就会产生干涉。

干涉曲线可用图解作图法或逐点计算法绘出，或按类似分析判别方法制作或计算机软件，将干涉曲线直接显示在屏幕上。一般情况下，工件半径是已定的，可改变电极半径控制干涉区大小，在不影响加工精度的范围内，宜选用较大电极直径以减小电极相对损耗，这对加工有利。

图解作图法是把图 2.8-85 所示图形按放大比例绘制，然后量出各不同点的 h 值和与 h 值相应点的 $\beta_2-\beta_1$ 值及 ΔT。由于绘图量度上偏差，绘出的曲线精确度较差，尤其是靠近相切点 P 易产生干涉的区域，因 h 值尺寸小，$\beta_2-\beta_1$ 角度亦小，量度偏差较大。但这种方法能较方便而迅速地绘出大致形状的干涉曲线，有时还可与计算所得干涉曲线数据相比较，概略验证计算结果有无较大差错。

逐点计算法是用一系列选定的 h 值代入计算式（2.8-8）和式（2.8-9）中算出与每一个 h 值相应的 ΔT，把计算结果绘制成曲线。h 值取得愈多，分级愈合理，干涉曲线就可绘制得愈精确。通过实例计算后可看到通常只要在加工相切点附近区域内把 h 值分得细密一些，就可得到比较精确的干涉曲线，因为脱离了干涉区的曲线段只要参考其大概形状，无需作数量上仔细推敲。

螺纹干涉区通常局限于电极与工件加工相切点附近区域，图 2.8-87 是图 2.8-86 的局部放大图。设电极牙顶尖越出工件上假想工型轮廓界面线的干涉偏差带水平方向宽度为 ΔS，则：

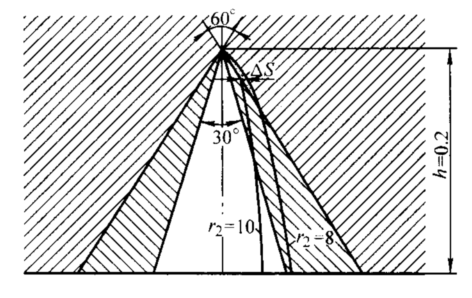


图 2.8-87　干涉曲线局部放大

$$\Delta S=\Delta T-h\tan\frac{\alpha_0}{2}=\frac{T}{2\pi}\arccos\frac{2r_1(r_2-h)+h^2}{2r_2(r_1-h)}-h\tan\frac{\alpha_0}{2} \tag{2.8-11}$$

ΔS 值从假想牙型轮廓界面线顶点开始逐渐增大，增至某一最大值后又逐渐减小至零，其最大值可由解极大值方法求得，此时：

$$\frac{\mathrm{d}\left[\frac{T}{2\pi}\arccos\frac{2r_1(r_2-h)+h^2}{2r_2(r_1-h)}-h\tan\frac{\alpha_0}{2}\right]}{\mathrm{d}h}=0 \tag{2.8-12}$$

若通过式（2.8-12）求解 h，从而求出 ΔS_{max} 值不方便，可用试探法取一系列 h 值代入式（2.8-11）进行计算，再用优选法逐步逼近求出 ΔS 最大值的近似值。

除了干涉曲线顶点以外，另一个 $\Delta S=0$ 点的 h 值也有一定参考价值，这里称它为干涉区域高度，并且用 h_0 表示。因为有了这个数据就可约略判断干涉区域大小，设法把干涉区域压缩在允许截去牙型部分，或于牙型精修成形前把截短牙型部分金属预先以开沟槽形式除去，消除螺纹干涉对工作牙底角部分成形的影响。

ΔS 值经过最大值后减小至零处的 h_0 值由下式解出：

$$\Delta S=\frac{T}{2\pi}\arccos\frac{2r_1(r_2-h^2)+h^2}{2r_2(r_1-h_0)}-h\tan\frac{\alpha_0}{2}=0 \tag{2.8-13}$$

此式亦可采用试探法取一系列 h 值代入，以逐步逼近方式求解 h_0 的近似值。

3.6　回转式电火花加工典型机床

JN 型展成式电火花精密加工机床（南京江南光电集团公司发明成果）可以实现上述很多种加工成形运动，生产应用上有很好的技术经济效果。该机床包括三个回转机构和四个直线移动机构，利用各机构间的协调配合，可组成多种运动形式，使它具有很丰富的加工功能，实现目前切削加工和特种加工机床所未能实现的工艺目标。能在硬质合金、不锈钢等难加工材料和淬硬钢及其他金属材料或特种结构工件上加工出许多种精密型面，如加工内外圆柱面、圆锥面、各种旋转曲面、平面、共轭曲面、棱柱面、棱锥面、球面、超半球面、螺旋面、等速螺旋面、齿形面及多种组合型面等，便于加工薄壁、小孔及微小型零件。精度达微米级，表面粗糙度 $R_a=0.32\sim0.04\ \mu m$，并且能在多种型面较大面积上实现电火花镜面加工（如表面积大于直径 150 mm 的圆平面、圆球面等）。

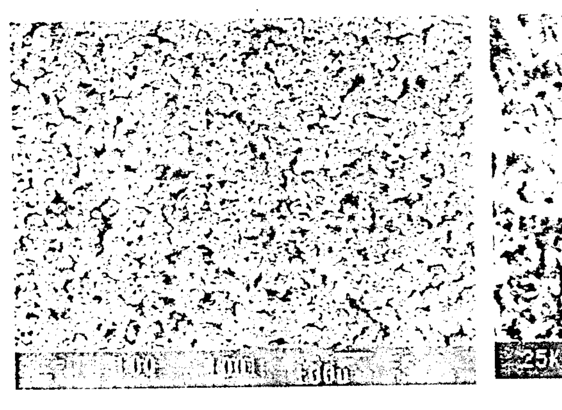
（1）构件布局和功能

机床的运动部件和结构布局示意见图 2.8-88。机床有三个转动机构，即工件头架回转轴 4、工具电极头架回转轴 8 和转台 6，四个直线移动机构，即坐标工作台中的纵、横向移动机构，工件头架座中的水平移动机构 2 和竖向移动机构 3。

点介绍电火花加工工艺。

4.1 聚晶金刚石等超硬材料的电火花加工

聚晶金刚石是将粒度相同的人造金刚石微粉用铜、铁、钛、钴等导电材料微粉作为粘接剂，将其均匀混合后在高温高压下烧结而成。金刚石微粉晶粒愈细，愈易制造出高精度切削刀具；晶粒愈粗，耐磨性愈好。工业生产中人造金刚石的粒度粗细视其用途选定。如石油地质钻头及制作砂轮修整器用的聚晶金刚石就应选用耐磨的粗晶粒金刚石微粉制作，其粒度约为 40 ~ 80 μm，而制作精车刀及精密拉丝模芯的聚晶金刚石，其金刚石粒度只有 5 ~ 15 μm。图 2.8-89 为聚晶金刚石扫描电镜照片，a 图放大 100 倍，b 图放大 500 倍。从照片中可清晰看到人造金刚石颗粒四周均匀地包有金属粘接剂（颜色发白），金刚石的粒度约为 20 ~ 25 μm。



(a)　　(b)

图 2.8-89 聚晶金刚石显微照片

聚晶金刚石刚问世时，大多采用传统的机械研磨工艺进行加工，周期既长，又要消耗大量的金刚石微粉，这是“硬碰硬”的加工，制造成本很高，限制了聚晶金刚石的推广应用。由于聚晶金刚石的粘接剂是导电材料，若采用电火花加工工艺，“以柔克刚”，加工效率可大幅度提高，大大促进了聚晶金刚石工具在现代制造技术中的应用。

电火花加工聚晶金刚石的原理是利用火花放电时产生的高温将粘接剂熔化、汽化，并使部分金刚石颗粒碳化或自基体剥落。从电火花加工蚀除物的显微检测得知，金刚石脱落所占比例极小，故加工蚀除物没有利用价值。其他如工程陶瓷及立方氮化硼等导电的超硬材料，同样可采用电火花加工工艺。

常用刀具超硬材料的物理特性照如表 2.8-8 所示。

表 2.8-8 常用刀具超硬材料物理特性对照

物理物性	黑陶瓷 Al_2O_3+TiC	硬质合金	聚晶金刚石 PCD	单晶金刚石
密度/$g\cdot cm^{-3}$	4.28	14.7	4.12	3.52
抗压强度/GPa	4.50	4.44	7.60	8.68
断裂韧性/$MPa\cdot m^{\frac{1}{2}}$	2.94	10.48	8.81	3.40
努氏硬度/GPa	17	17	50	57 ~ 104
弹性模量/GPa	390	593	776	1 141
线胀系数/$10^{-6}K^{-1}$	7.8	5.4	4.2	1.5 ~ 4.8
热导率/$W\cdot m^{-1}\cdot K^{-1}$	9.0	100	540	500 ~ 2 000

4.1.1 聚晶金刚石电火花加工的工艺特点

1）聚晶金刚石的导电性能因其所用粘接剂配方的不同而差别极大。国产聚晶金刚石的导电性与国外产品相近。就整体导电性来说，聚晶金刚石属不良导体。因此电火花加工时宜采用较高的峰值电压（通常不低于 180 V）。

2）聚晶金刚石的导热性极好（优于银、铜）、因此加工聚晶金刚石时，电流脉冲的前沿要尽可能陡，脉冲宽度要窄，以减少热传导损失。

3）加工所用最佳脉冲参数要针对不同型号的聚晶金刚石通过试验摸索确定。由于聚晶金刚石是由金刚石微粉和粘接剂粉末混合压制、烧结而成，因而在加工参数选择上与粉末冶金零件有相似之处，即加工脉冲能量大小对加工表面粗糙度影响不大。

4）为提高聚晶金刚石粗、中加工速度，应大幅提高放电爆炸力；而精加工时，为改善加工表面质量及表面粗糙度，应减小放电能量，主要依靠电热效应，使金刚石在局部、瞬时热作用下表面碳化，达到精加工的目的。

4.1.2 聚晶金刚石的电火花穿孔加工

电缆行业使用的拉丝模具，近年来已普遍采用聚晶金刚石制造。拔丝径在 2 mm 以下的拉丝模腔预孔，目前大多采用激光加工；大孔径的拉丝模具以往也采用激光加工预孔，由于去除材料多，加工时间长，成本很高，预孔中聚晶金刚石也全部碳化而浪费了。近年来已改为电火花套料加工方式，拉丝模芯部套出的聚晶金刚石可用于制造小规格的拉丝模或制作金刚石修正笔等，既节约了原材料，又降低了成本。例如用 $\phi3.8$ mm 薄壁紫铜管进行电火花套料加工，芯部可留下 $\phi2.5$ mm 左右的聚晶金刚石柱（具体尺寸取决于紫铜管的壁厚）。套料加工示意图如图 2.8-90 所示。

加工所用脉冲电源为高低压复合脉冲电源，工具电极为薄壁紫铜管。加工时，工作液从电极管内流出，将蚀除产物自加工区冲走，保持稳定的放电加工。当预孔小于 3 mm 时，芯部料很小，工具电极可改用实心铜棒，工作液围绕电极四周冲向放电部位。采用冲液加工方式可有效防止加工孔径深时蚀除物的堆积，冲液压力为 0.05 ~ 0.10 MPa。开始加工时，宜采用高压（300 V 以上）加工，待电极前端全部进入工件后，再加低压电流脉冲。预孔加工完成后，改用锥面电极加工拉丝模具的出、入口及压缩区等部位，最后再用超声波研磨与抛光工艺，完成拉丝模具的成品加工。

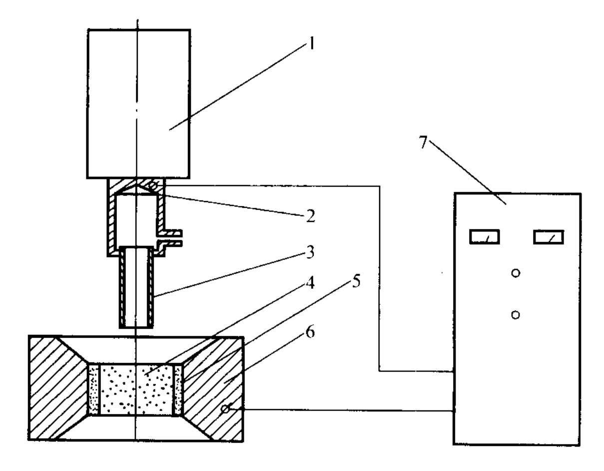


图 2.8-90 聚晶金刚石套料加工示意图
1—主轴头；2—电极夹具；3—工具电极；4—聚晶金刚石；
5—硬质合金镶套；6—模具外钢套；7—脉冲电源

4.1.3 聚晶金刚石平面的电火花加工

当使用聚晶金刚石制作刀具时，因聚晶金刚石与钢材的亲和力及焊接性能差，大多用硬质合金作为衬底材料，制成聚晶金刚石复合片，以改善刀头与刀具的焊接强度。硬质合金衬底的厚度通常在 1 ~ 4 mm 之间，视刀具用途分别选定，聚晶金刚石层的厚度约为 0.5 ~ 1.2 mm。而用作石油地质钻头的聚晶金刚石复合片，其聚晶金刚石层厚度达 2 ~ 4 mm，而硬质合金衬底厚度为 8 ~ 15 mm。

压制烧结后的聚晶金刚石坯料，必须进行加工后方可用作制作刀具或钻头等用途。

图 2.8-91 为聚晶金刚石复合片坯料结构示意图。

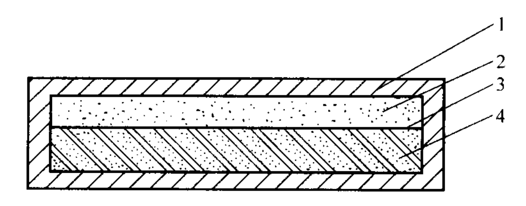


图 2.8-91 聚晶金刚石复合片坯料结构示意图
1—防护层；2—聚晶金刚石层；3—过渡层；4—硬质合金

防护层 1 的功能是保护金刚石晶粒及粘结剂在烧结过程中不碳化与氧化。聚晶金刚石层 2 为人造金刚石微粉及金属粘结剂微粉均匀混合后高温高压合成，过渡层 3 的功能是改善聚晶金刚石层与衬底硬质合金 4 的结合强度，防止两者因热导率相差过大，切削时在切削力及热应力作用下分层脱落。硬质合金层主要起对聚晶金刚石的支撑及改善刀头与刀体焊接强度的作用。

由于防护层大多为非导电材料，混杂有少量金属粘结剂及少量金刚石微粉，导电性很差。因而正式电火花磨削前须先去除预防护层，可采用机械研磨、磨削或特种加工工艺等方法予以去除。实践证明：机械加工方式去除防护层效果不佳；激光剥离也因效率低、成本高而难于采用；采用高电压电火花剥离法是行之有效的加工工艺。目前去除防护层的速度约为 20 ~ 40 mm^3/min。当防护层去除后，即可参照电火花穿孔的有关参数进行聚晶金刚石平面磨削加工，磨削速度约为 10 ~ 20 mm^3/min、表面粗糙度 R_a 可达 0.2 μm。图 2.8-92 为聚晶金刚石复合片电火花平面磨削加工示意图。

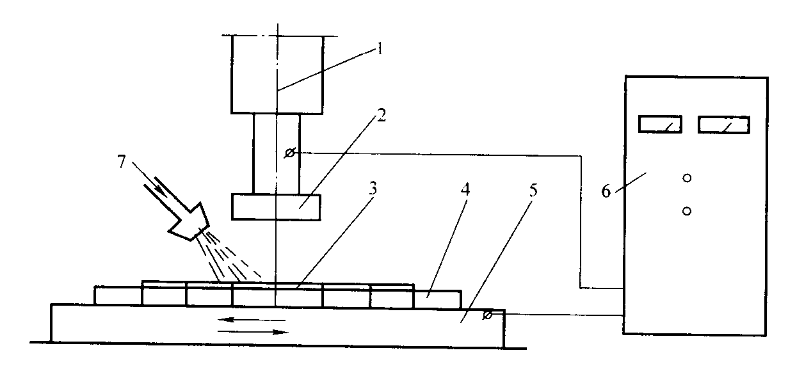


图 2.8-92 电火花平面磨削加工示意图
1—主轴头；2—工具电极；3—聚晶金刚石；4—挡块；5—磁力吸盘；
6—脉冲电源；7—工作液喷嘴

电火花磨削的工具电极可用紫铜或高纯石墨制作。如果加工所用的电火花机床主轴头有旋转功能，在电火花磨削加工时令电极作低速旋转（20 ~ 80 r/min），电极将均匀损耗，无需修整，有利于提高加工效率。工作台移动速度与机械磨削相似即可。由于硬质合金的磁导率低于钢铁，吸力不大，在电火花磨削前应先将硬质合金面磨平，然后在聚晶金刚石复合片四周用挡块挤紧，防止工件磨削时松动，必要时可用真空吸盘。

为了达到磨平聚晶金刚石表面的目的，机床的主轴头 Z 向不能采用伺服进给方式，应采用点位步进进给方式，即主轴头 Z 向进给 0.01 ~ 0.02 mm 后锁住，不得继续进给或回退。加工一段时间空载脉冲居多时，再令主轴头进给 0.01 ~ 0.02 mm，如此反复，直至磨平为止。为了达到要求的表面粗糙度，当表面磨平且加工余量为 0.10 ~ 0.15 mm 时，应换中规准磨削；当余量只有 0.02 ~ 0.04 mm 时，换精规准加工。由于聚晶金刚石合成时所用的金刚石晶粒大小及黏结剂种类各不相同，加工所用电参数也不相同，具体参数通常需经试加工确定。

聚晶金刚石复合片完成加工后，即可用作刀具制作的原材料。根据客户的不同需求，有些聚晶金刚石复合片在电火花磨削后仍需研磨或抛光，使表面粗糙度 R_a 达 0.01 μm。按照刀具图纸要求，采用激光或电火花线切切割工艺，将刀头切割成所需形状，焊接到刀体上，再经刀具磨床精磨刃口，制成合格的聚晶金刚石刀具。由于聚晶金刚石的线胀系数与硬质合金衬及刀体的钢材相差较多，焊接后刀具应妥善保温，缓慢冷却，防止快速冷却因内应力过大造成刀片的碎裂与刀体分层。

4.2 非导电材料的电火花加工

一切导电材料包括金属和非金属、半导体等都可采用电火花加工技术将其切断、打孔或成形加工。但对非导电材料，由于其不导电或电阻率很高，难于火花击穿并形成放电



回路，因此也就难于进行电火花加工。

随着非导电的工业陶瓷材料如氧化铝、氧化锆、氮化硅、高电阻率的聚晶金刚石（PCD）以及立方氮化硼（CBN）等超硬材料的广为采用，近十年来电加工界竞相研究非导电材料的电火花加工技术，并已取得了一定的进展。

4.2.1 高电压辉光放电加工法

这是早期针对不导电的天然金刚石作为拉丝模，用此法先在其正反表面加工出小的锥形凹坑预孔（然后再用超声研磨的方法加工出拉丝模），其加工原理如图2.8-93所示。在尖电极与平板电极间放入绝缘的工件，两极间加以直流或工频交流高电压，使尖电极附近的空气被击穿，发生辉光放电蚀除。但辉光电流小，加工效果差。由于两极间存在寄生电容，把电源变为高频或脉冲性，可以通过相当多的辉光电源。一般使用高压高频电流，其电压为5 000～6 000 V，最高电压为12 000 V，频率为数十千赫到数十兆赫。

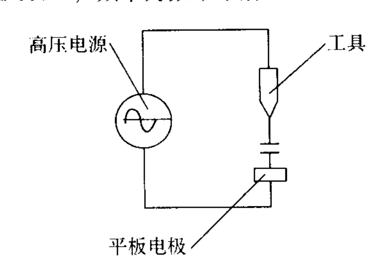


图2.8-93 高电压辉光法加工原理

图2.8-94是尖电极加工金刚石工件的示意图。当尖电极以自重压力压在金刚石上，两极间接50 Hz交流电源，电压逐渐升高，当达1 200 V开始放电，到5 000 V时引起强烈放电，在加工间隙间得到频率非常高的重复放电（如图2.8-94a所示）：再提高电压就会使电极烧红，且加工速度低。这种放电加工方法在坑深不大时尚可，坑太深时将发生侧面放电，使加工不能进行（如图2.8-94b所示）。此法加工坑的形状粗糙，要用机械加工修研。但作为粗加工来说，加工速度快，也比较经济。

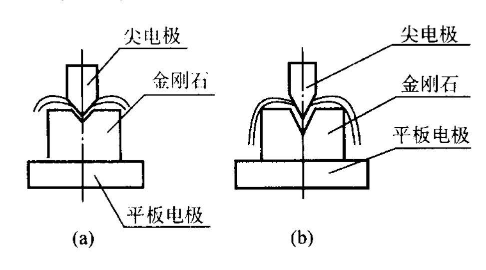


图2.8-94 尖电极加工金刚石工件示意图

4.2.2 电解电火花放电复合加工

电解电火花放电复合加工是当前研究最多的非导电超硬材料电加工技术，它是借助于电解液中的火花放电作用来蚀除工件的一种电加工方法。

日本学者采用脉冲电源和直径0.5 mm的钢电极，分别在NaOH、$NaNO_3$和NaCl电解液中，对非导电的Al_2O_3陶瓷进行了电解电火花放电复合加工小孔的试验研究。其加工原理如图2.8-95所示。加工时工具电极接负极，辅助电极接正极，当两极间加上脉冲电压时，由电化学作用，在工具电极表面产生气泡，通过此气泡使工具电极表面与导电的工作液间形成高的电位梯度，引起火花，靠放电时的瞬时高温及冲击波等作用来达到蚀除工件的目的。试验给出了生产率与上述三种电解质的关系，如图2.8-96所示。由此图可看出NaOH水溶液是最适合于非导电Al_2O_3陶瓷加工的电解液。

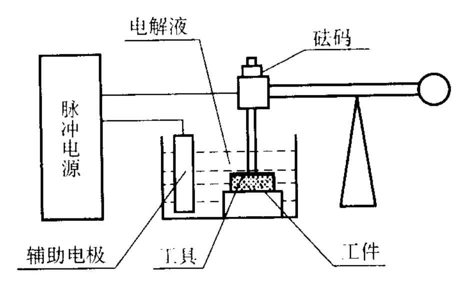


图2.8-95 放电复合打孔原理图

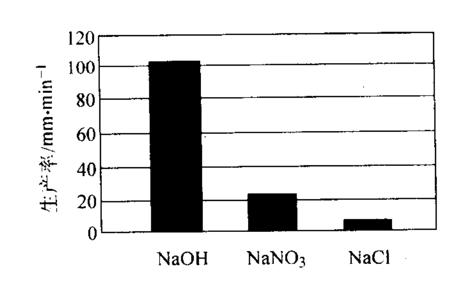


图2.8-96 电解质的种类与生产率的关系

上述有辅助电极的电解电火花放电复合加工的原理如图2.8-97所示。工具、工件及辅助电极均处在电解液中，由于工作液的导电性较强，因此工具电极与辅助电极间的电阻很小，在通常情况下，当外部电压作用到该两极上时，两极间立即产生电解作用，虽流过较大电流，但电极间的电压较低，形成不了击穿和火花放电条件。在此情况下，要想使工具电极表面有火花放电产生，必须使工件与工作液间形成一层非导电相例如气体层，以提高两极间的电压，即提高两极间的电场强度，才有可能产生火花放电。

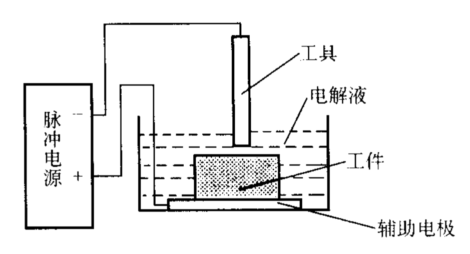


图2.8-97 电解电火花复合加工原理图

电解电火花复合加工非导电材料时的火花放电加工过程如图2.8-98所示。图2.8-98a为外部电压没加到两极上时的情况，此时工具与工作液间无任何反应产生。图2.8-98b为外部电压刚加到两极上的情况，此时由于工作液的电阻小，该电压可在两极间形成很高的瞬时电流，由于电场的尖端效应，首先在工具电极的尖角处由电化学作用产生气泡。图2.8-98c为外部电压加到两极上一段时间后的情况，此时工具电极在电解液中的表面由电解作用形成一层气体覆盖层，使两极间的电压升高。这主要是工具电极与工作液间的电压升高，当电压升高至使某处的电场强度达到该气体的击穿强度时，便在该处产生火花放电，从而达到火花蚀除加工的目的。图2.8-98d为火花放电时的示意图，由于尖端放电效应的作用，火花放电总是先从工具电极的尖角及端面处开始，当外加电源电压较高，且限流电阻较小时，在电解液中的所有工具表面上都可能同时产生火花放电。实际加工时工具电极的侧面仅是电解，不易形成火花放电，且侧面的电解起不到去除不导电的工件材料的作用，因此侧面电解是人们不希望发生的。



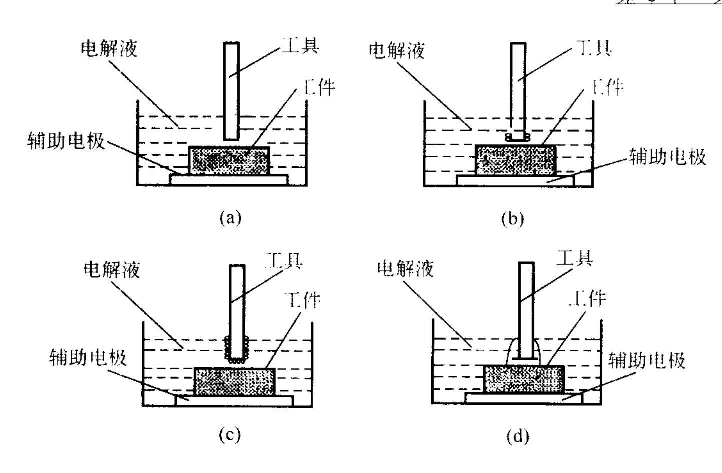


图 2.8-98　电解电火花复合加工的火花放电过程原理图

基于上述情况，哈尔滨工业大学刘永红博士提出主要不靠电化学作用形成电解液中产生火花放电所需的气体非导电相的两种新方法，即以机械电解电火花复合加工和充气式电解电火花复合加工的方式形成上述非导电相的新方法。

4.2.3　机械电解电火花复合加工

(1) 机械电解电火花复合加工及其原理

机械电解电火花复合加工技术的加工原理如图 2.8-99 所示。图中工具电极为齿状圆周电极，该电极装在由变频调速电机驱动的回转主轴头上，该主轴头可沿 Z 轴作上下运动；工件装在可作 X 轴和 Y 轴方向运动的工作台上；工作液通过喷嘴浇注于工具与工件之间；加工电源为全波整流直流电源。加工时所需的非导电气体相及连续可控的脉冲性火花放电，均通过高速旋转的齿电极与工件间的相对运动形成。其形成过程原理如图 2.8-100 所示。

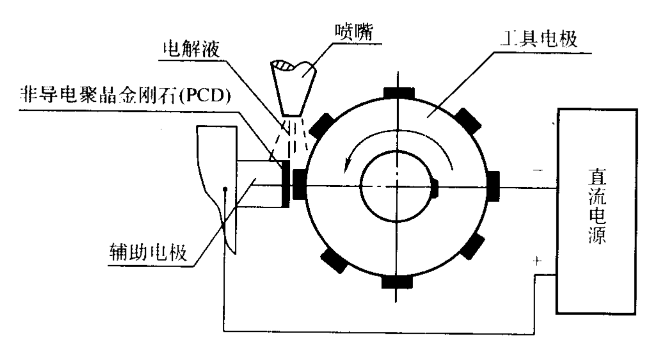


图 2.8-99　机械电解电火花复合加工原理图

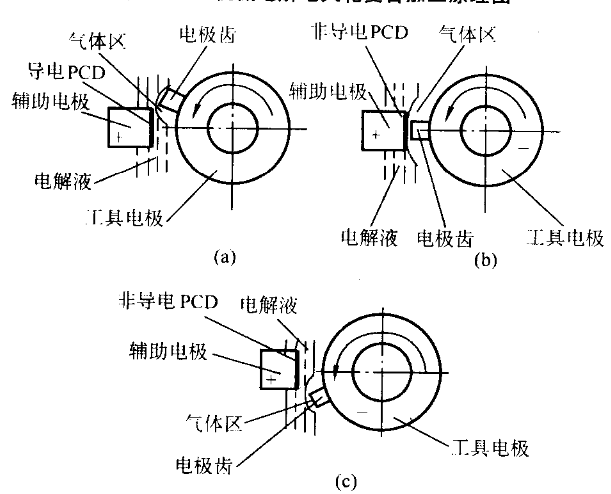


图 2.8-100　机械电解电火花复合加工放电过程原理图

在机械电解电火花复合加工过程中，半径较大的工具电极以很高的速度作旋转运动，因此其圆周上的电极齿的切线速度很大。当这一高速运动的电极齿进入慢速浇注工作液中时，会产生很大的冲击力和离心力，使与其表面接触的工作液被抛离，只有一层气膜吸附在电极齿的整个表面。如图 2.8-100a 所示。该气膜使工具电极与工作液绝缘隔开。此时，由于齿顶与工件间的距离较大，气体膜较厚，不能产生火花击穿放电。当工具电极转到图 2.8-100b 所示的位置时，由于工具电极齿的齿顶部与工件间的距离变小，而使齿顶处的气体膜被压窄、电场强度增加，此时若某处的电场强度达到该气体相的击穿强度便产生火花放电。当工件转到图 2.8-100c 所示的位置时，工具电极齿已离开工件，此时由于电火花放电时产生的瞬时高温、高压作用，使电极齿表面的气体区膨胀，而造成工具电极齿与电解液间的距离变大，火花放电停止。待下一个电极齿到达图 2.8-100b 所示的位置再产生下一个火花脉冲放电，这样如此往复地进行下去，便达到了火花蚀除工件材料的目的。

(2) 机械电解电火花复合加工技术的特点

1) 采用机械方法形成电解液中火花放电所需的非导电相（气体相），其气体相的形成速度快，可节省大量的电解能消耗，提高加工效率。

2) 采用直流电源，使脉冲性火花放电在工具电极与工件的相对运动过程中产生，省去了专用脉冲电源，使加工设备大为简化，降低了设备成本。

3) 工具电极上开槽并旋转，有利于电蚀产物的排除，提高了加工过程的稳定性和火花放电的利用率。

4) 可通过变工具电极的齿数、齿型、转速等很方便地改变脉冲放电参数。

5) 工具电极价格低廉、制造方便，工具电极在使用中有自平整作用，因而加工平面时，可以长期使用不需修整。

6) 在一定的运动条件下，可以实现切割以及加工平面、圆柱面、圆锥面和其他各种成形面。

7) 可高效地加工非导电聚晶金刚石、立方氮化硼等的大表面。

图 2.8-101 给出了该种复合加工方法同时加工多片 PCD 或 CBN 时的原理图。图中工件为非导电 PCD 复合片被同时的安装在一个回转夹具上，工具为端齿钢电极，辅助电极与工具电极分别与直流电源的正负极相连。加工时工具电极和工件回转夹具同时作回转运动，同时工具电极沿 Z 轴作进给运动，工作液冲注于工具电极、工件和辅助电极之间，借助于电解液的导电作用形成非导电 PCD 表面可产生火花放电的条件，通过高速旋转的齿状工具电极与工件间的相对运动形成连续可控的脉冲性放电，从而达到火花放电蚀除工件的目的。

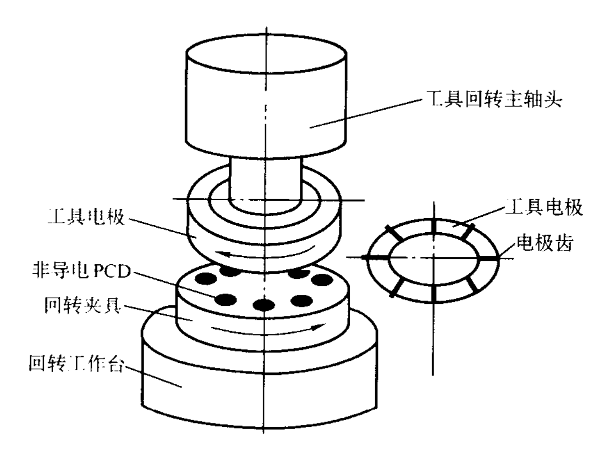


图 2.8-101 多片 PCD 的机械电解电火花复合加工示意图

4.2.4 充气式电解电火花复合加工

(1) 充气式电解电火花复合加工的原理

由上述机械电解电火花复合加工的原理分析知，该种加工方法不适用于非导电超硬材料的打孔。为此又对电解电火花复合打孔技术进行了研究，针对通常的电解电火花复合打孔时效率低、能耗大，且孔深较浅的问题，提出了两种有效的解决措施。

对孔径小于 2 mm 的孔，采用电极侧面绝缘的方法。由上述分析可知，工具电极在电解液中火花放电的条件是其表面必须被气体层包围，形成高的电位梯度；而工具电极的侧面电解和放电是不希望的，于是提出了将工具电极侧面绝缘的方法，其加工原理如图 2.8-102 所示。加工时首先由电解作用在工具电极（负极）的端面产生非导电的氢气气体相，使电极断面与工作液间绝缘，形成高的电位梯度，引起火花放电。电解时，负极（工具电极）表面将析出氢气泡，正极表面金属原子失去负电子成为正离子而溶解进入电解液，其电化学方程式为：

阳极：$2H^+ + 2e \rightarrow H_2 \uparrow$

阴极：$M - 2e \rightarrow M^{2+}$

式中，M 为金属原子。

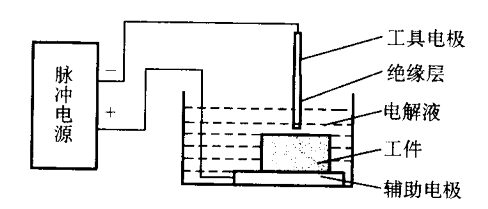


图 2.8-102 工具电极侧面绝缘的电解电火花复合加工原理图

充气式电解电火花复合加工的原理见图 2.8-103。加工时，由气压可调的供气装置，通过电极的内孔向工具电极与工件间充气，在工具电极的端面形成一层气体膜。此时若脉

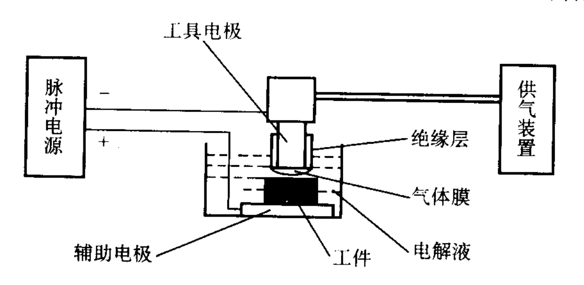


图 2.8-103 充气式电解电火花复合加工原理图

冲电压加到工具电极与辅助电极间，便在工具电极表面气体层产生电场强度。该气体膜中某处的电场强度如果达到击穿强度，便在该处产生火花放电，由火花放电时的瞬时高温及冲击作用来达到蚀除工件的目的。

(2) 充气式电解电火花复合加工的特点

1) 电解液中产生火花放电的条件是两极间必须有非导电相存在，这一非导电气体相可由电解和非电解作用形成。

2) 机械电解电火花复合加工技术用机械的方式形成电解液中火花放电所需的气体相，可节省大量的电解能消耗，提高加工效率；该种加工方法可高效地加工非导电超硬材料的较大平面和其他成形面。

3) 在进行型孔加工时，工具电极的侧面应加以绝缘，以减少电解能的消耗和提高加工效率。当工具电极直径小于 2 mm 时，可用电解作用直接形成非导电气体相的方法进行加工。

4) 当工具电极直径大于 2 mm 时，这时用充气的方法在电极端面形成非导电气体相来加工非导电超硬材料，其最大特点是可加工较大直径和面积的型孔而免去高速的机械转动来产生气体相（气膜）。

5 电火花表面强化改性及沉积技术

电火花表面改性技术是利用工件和电极之间的电火花放电，在工件表面形成一层所要求性能的处理膜，来实现对工件表面进行强化、改性的技术。主要有气体中电火花表面强化（传统的电火花表面强化），液中电火花放电沉积表面改性处理，钛合金电火花放电着色，气体中放电沉积造型等。

5.1 气体中电火花表面强化（改性）

气体中电火花表面强化使用数十安以下的短脉冲电流的电容器电源，电极材料在气体中熔化蒸发覆盖在工件表面。实际应用中，多采用使电极高速回转或使电极振动的方法。

5.1.1 气体中电火花表面强化的装置和原理

图 2.8-104 是金属电火花表面强化装置的加工原理示意图。在工具电极和工件之间接上直流或交流电源，由于振动器的作用，使电极与工件之间的放电间隙频繁通断变化，工具电极与工件间不断产生火花放电，从而实现对金属表面的强化。

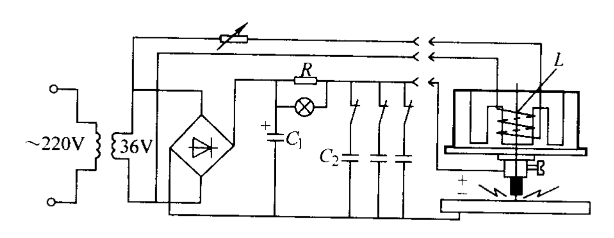


图 2.8-104 气体中金属电火花强化装置加工原理图

电火花强化过程原理如图 2.8-105 所示。当工具电极与工件之间距离较大时如图 2.8-105a，电源经过电阻 R 对电容器 C 充电，同时工具电极在振动器的带动下向工件运动。当间隙接近到某一距离时，间隙中的空气被击穿，产生火花放电（见图 2.8-105b），使工具电极和工件材料表面局部熔化，甚至汽化。当电极继续接近工件并与工件接触时（见图 2.8-105c），在接触点处流过短路电流，使该处继续加热，并以适当压力压向工件，使工具电极和工件表面熔化了的材料相互粘结、扩散形成熔渗层。图 2.8-105d 为工具电极在振动作用下离开工件，由于工件的体积和吸收、传导的热容比电极大，使靠近工件的熔化层首先散热急剧冷凝，从而使工具电极表面熔融的材料粘接，覆盖在工件上。



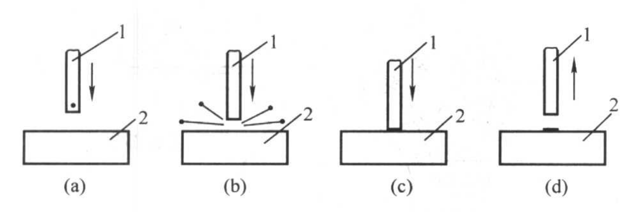


图 2.8-105 电火花表面强化过程原理图

1—工具电极；2—工件

5.1.2 电火花表面强化层的特性

1）当采用硬质合金作电极材料时，硬度可达 1 100 ~ 1 400HV（约 70HRC 以上）或更高。

2）当使用铬锰、钨铬钴合金、硬质合金作工具电极强化 45 钢时，其耐磨性比原表层提高 2 ~ 2.5 倍。

3）用石墨作电极材料强化 45 钢表面后，用食盐水作腐蚀性试验时，其耐腐蚀性提高 90%。用 WC、CrMn 作电极强化不锈钢时，耐蚀性提高 3 ~ 5 倍。

4）耐热性好可以提高使用寿命。

5）疲劳强度提高 2 倍左右。

6）硬化层厚约为 0.01 ~ 0.08 mm。

电火花强化工艺方法简单、经济、效果好，因此广泛应用于模具、刃具、量具、凸轮、导轨、水轮机和涡轮机叶片的表面强化，也可用于动平衡改变微量质量，用于轴、孔尺寸配合的微量修复。

用不同电极材料对金属表面强化后，改变了原金属表层的物理、化学性能，称之为表面改性。例如铝合金和钛及钛合金不易钎焊，如果用铜、镍、银等材料作为工具电极对上述表面进行电火花表面改性（强化），镀覆上一层易焊接的金属材料，就可以进行钎焊。

电火花强化器除少量用于大件或大批量生产成为专用设备外，一般大多为手持式（便携式）。操作时要使工具电极在工件表面上往复来回移动，直到由强烈飞溅橙红色火花逐渐减少成微弱的蓝色火花，表面呈均匀细致的白色亮层为止。

5.2 气体中电火花刻字工艺及装置

电火花表面强化的原理也可用于在产品上刻字、打印记。过去有些产品上的规格、商标等印记都是靠涂蜡及仿形铣刻字，然后用硫酸等酸洗腐蚀，有的靠用钢印打字。工序多，生产率低，劳动条件差。国内外在刃具、量具、轴承等产品上用电火花刻字，打印记取得很好的效果。一般有两种办法，一种是把产品商标、图案、规格、型号、出厂年月日等用铜片或铁片做成字头图形，作为工具电极，如图 2.8-106 那样，工具一边振动，一边与工件间火花放电，电蚀产物镀覆在工件表面形成印记，每打一个印记约 0.5 ~ 1 s；另一种不用现成字头而用钼丝或钨丝电极，按缩放尺或靠模仿形刻字，每件时间稍长，约 2 ~ 5 s。如果不需字形美观整齐，可以不用缩放尺而成为手刻字的电笔。图 2.8-106 中用

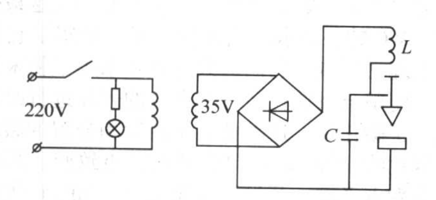


图 2.8-106 电火花刻字打印装置线路

L—振动器线圈，ϕ0.5 mm 漆包线 350 匝

铁心截面约 0.5 cm²；C—纸介电容，0 ~ 0.1 μF，200 V

钨丝接负极，工件接正极，可刻出黑色字迹，若工件是镀黑或表面发蓝处理过的，则可把工件接负极，钨丝接正极，可以刻出银白色的字迹。

5.3 气体中放电沉积堆积造型

日本毛利尚武教授、斋藤长男教授和三菱电机名屋层制作所合作进行液中电火花放电表面改性处理时，在 S45C 钢上成功地堆积出 WC（碳化钨）厚膜，并进行了将电火花堆积和电火花去除加工组合对工件修复的实验。毛利尚武教授还用细的钨电极（ϕ0.1 mm）成功地进行了电火花堆积。日本名古屋工业大学早川伸哉博士等，通过计算钢打钢时正极和负极的温度分布，选择合适的电参数，使得工具电极的放电点温度超过其材料的沸点，工件电极的温度在其材料的熔点和沸点之间，在空气中进行了电火花堆积造型实验，图 2.8-107 为电火花附着堆积的微细圆柱（直径约 ϕ140 μm，高 2.2 mm），工件和电极都是 S45C 钢，电极直径 ϕ0.1 mm，放电电流 2.5 A，脉宽 5 μs，工件接脉冲电源负极，加工时间 6.3 h。图 2.8-108 为电火花附着堆积后其他参数不变，仅将加工极性变为电极接脉冲电源的负极，电极错开半个直径进行电火花去除加工所得的样件。图 2.8-109 为电火花附着堆积加工物的断面，白色截面上黑色小坑是硬度试验压痕，其硬度为 500HV，远高于 S45C 钢的硬度 200HV。

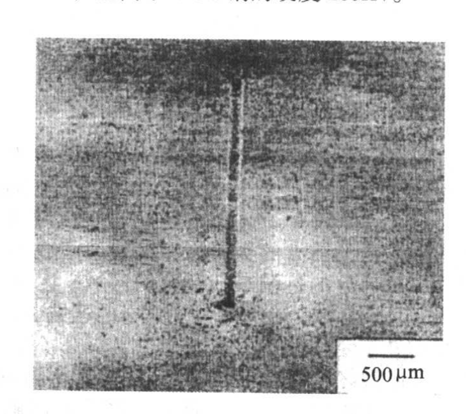


图 2.8-107 空气中负极电火花附着堆积的微细圆柱

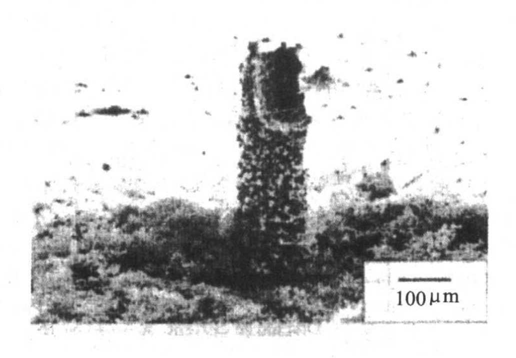


图 2.8-108 电火花附着堆积后电火花去除加工

5.4 钛合金水中电火花放电着色

日本大阪府立产业技术综合研究所的增井清德和南久开展了钛合金线切割放电着色和钛合金电火花放电着色的研究。图 2.8-110 为线切割着色简图，使用单向脉冲电源，工件接脉冲电源的正极，工具电极丝接脉冲电源的负极，工作液为去离子水［电阻率为：（1 ~ 20）× 10^4 Ω·cm］，它是利用线切割放电的电解作用在钛合金上形成透明的氧化钛膜，由光的干涉作用，不同厚度的氧化钛膜将得到不同颜色的干

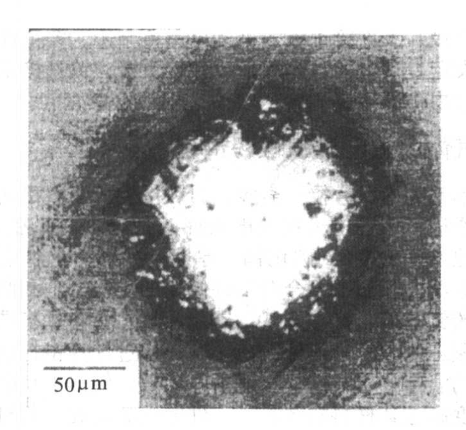


图 2.8-109 电火花附着堆积加工物的断面

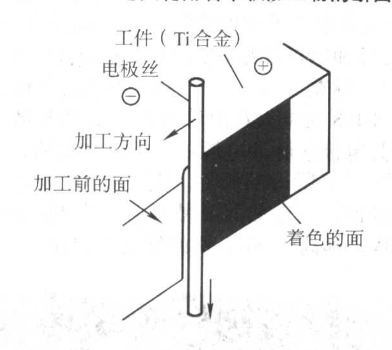


图 2.8-110 线切割着色简图

涉光，通过控制氧化钛膜的厚度就可对钛合金着不同的颜色。图 2.8-111 线切割着色机理模型，如果把加工面的着色状态分类，可将其分为 *A*、*B*、*C* 三个区域。区域 *A* 为从丝的位置到加工方向的前方的金属光泽区域。区域 *B* 为从丝的位置到其稍后部分的色调渐渐变化的区域。区域 *C* 为区域*B* 后的均一色调区域。在频繁发生放电的区域 *A*，钛合金基体的金属面处于暴露状态，在其通过区域 *B* 时，将受到着色作用，形成最终色调的加工面 *C*。影响着色的加工面的阳极氧化膜是由在区域 *B* 流过的漏电流产生的电解作用形成的。在呈金属光泽的区域 *A*，基体 Ti 的浓度比较高，O 的浓度低。在过渡区域 *B*，沿着加工的后方（加工的相反方向）Ti 的浓度渐渐减少，O 的浓度增加。另外，在均一着色面的区域 C，Ti 的浓度低，O 的浓度高，其浓度几乎不变。因为 Ti 对 O 非常有活性，所以可认为在加工面形成了 Ti 的氧化膜。为考察这种氧化膜和着色面的关系，进行了变换加工极性（钛接负极，丝接正极）加工和交流脉冲加工试验。钛接负极加工和交流脉冲加工的加工面分别呈钛材料的银白色，不能获得鲜艳的着色面，另外，与氧化膜的存在相连的 O 的浓度极低。由此可知，钛合金电火花放电着色是由放电露出的金属面，被其后的电解作用生成氧化膜，光线在氧化膜上发生干涉而获得的。在加工面形成的氧化膜的厚度决定最终的色调。平均加工电压和氧化膜厚度有一定的关系。影响加工面色调的氧化钛膜的厚度范围为 130 ~ 250 nm，随着平均加工电压的增加，膜的厚度几乎线性地增加。平均加工电压在 55 ~ 110 V 范围内，由 55 V 逐渐变化增大时，加工面的色调由黄色到红、蓝、绿、黄、红色变化一周。即通过控制平均加工电压，就能在加工面产生所有的色调。图 2.8-112 为电火花放电加工着色图案。

5.5 油中电火花放电沉积表面改性处理

5.5.1 油中电火花放电沉积表面改性处理的原理

油中电火花放电沉积表面改性处理（ElectricalDischarge

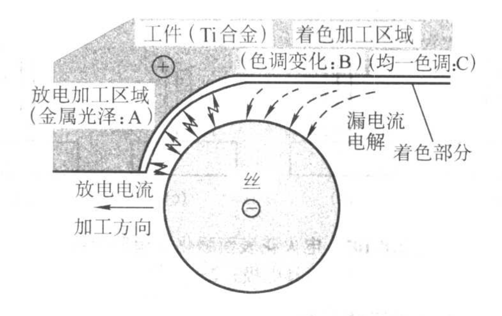


图 2.8-111 线切割着色机理模型

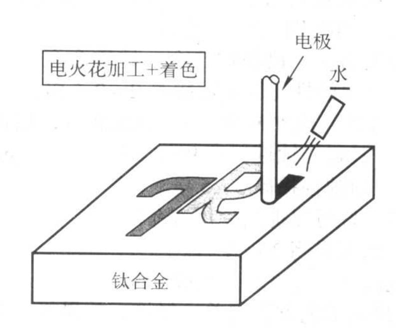


图 2.8-112 电火花放电加工着色图案

Coating EDC）是把像 WC 那样的碳化物或 Ti 那样的在油中电火花放电时容易被碳化的物质压结成形后作电极（粉末压结体电极），对钢和硬质合金的表面进行放电，来形成高硬度、高耐磨损的表面的技术。图 2.8-113 为压结粉末电极在油中电火花放电表面处理的原理，如图 2.8-113 所示，用容易形成碳化物的金属粉末复合压结体作电极，在电极和被处理表面（工件表面）加上放电脉冲，使得在被处理表面形成处理覆盖膜。在这个过程中，工作液煤油受热分解生成的分解碳和电极的金属成分反应生成金属碳化物。如果使用钛系材料作电极，就能堆积极硬的碳化钛硬质处理覆盖膜。

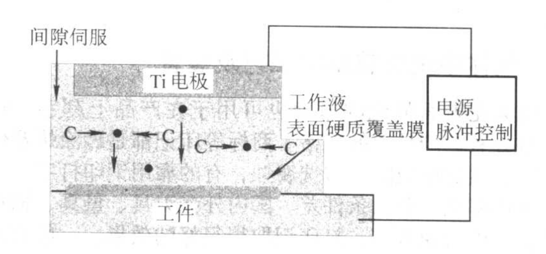


图 2.8-113 压结粉末电极在油中电火花放电表面处理原理

5.5.2 油中电火花放电沉积表面改性处理的种类

油中电火花放电沉积表面改性处理是从用硅电极对不锈钢进行加工后，发现有极优越的耐腐蚀作用开始研究的。其后进行了把像粉末压结体和烧结体那样的复合结构体作为电极的液中电火花放电表面改性处理的开发。在这最初时，使用 Cu、Al、WC 的各粉末压结体作电极，证实了它们转移堆积到了被处理材料侧。它们的共同点是采用了粉末压结体电极。另外，使用金属钛粒子对铝合金的表面进行改性，在其表面堆积上了碳化钛，这种情况是由钛和分解的碳热反应形成了金属碳化物（TiC）。从更容易获得更致密、高耐磨性的硬质膜的出发点考虑，开发了用氢化钛（TiH_2）代替钛粒子压缩成形的复合结构体电极法。但氢化钛（TiH_2）粒子在空气中缺乏稳定性，成形电极大小又限制了其实用化。为此，用碳化钛的烧结体电极进行了实验研究。



油中电火花放电表面改性处理主要有硅电极油中电火花放电表面改性处理，混粉（硅粉等）油中电火花放电表面改性处理，粉末压结体电极油中电火花放电表面改性处理，粉末烧结体电极油中电火花放电表面改性处理，细小电极油中电火花放电表面改性处理等。表 2.8-9 列出了目前主要进行的油中电火花放电表面改性处理。

表 2.8-9　油中电火花放电沉积表面改性处理的种类

电极		工件材料	电参数	膜厚	硬度、密着性、耐腐蚀性等的加工特性	用途
固体电极	硅电极	不锈钢 特殊合金工具钢 一般软钢 铝	$I_p = 1 \sim 3$ A $t_i = 2 \sim 4\ \mu s$ $t_0 = 2 \sim 4\ \mu s$ （Df = 50%）	3 ~ 4 μm	在 SUS304 上形成 3 ~ 4 μm 的非晶态层，基体和电焊部分在王水中都不腐蚀，30% 的永久变形也不产生剥离和裂纹。13Cr 钢的高温耐腐蚀性高（900℃ 20 h） 耐磨损性高	提高原子能设备、化学设备、海水设备、焊接部分的耐腐蚀性、耐磨损性
	金属钛电极	硬质合金	$I_p = 10$ A $t_i = 30 \sim 130\ \mu s$ $t_0/t_i = 16$ （5 min）	1 ~ 4 μm	由煤油中放电生成 TiC，硬度 2 500 ~ 3 000HV，膜的厚度由 t_i、I_p 决定，处理时间即使进行 5 min 以上，膜的厚度也没有增加	硬质合金的部分硬化
粉末压结体电极	铝粉末压结电极	一般钢铁	$I_p = 20$ A $t_i = 512\ \mu s$ $t_0 = 512\ \mu s$	30 μm	生成 $AlFe_3C_{0.5}$ 高耐腐蚀金属间化合物 弯曲试验	提高耐腐蚀性
	钛和铝的粉末压结电极	铝 一般钢铁	$I_p = 5 \sim 23$ A $t_i = 32 \sim 512\ \mu s$ $t_0 = 64 \sim 1\ 024\ \mu s$	25 ~ 120 μm	生成 TiC、TiAl，硬度增大，TiC 的体积比为 25% ~ 70%，硬度 3 000HV，因 I_p、t_i 加工时间不同而变化，表面最硬，内部硬度逐渐降低	提高汽车发动机、铝模具的耐磨损性
	陶瓷和结合剂电极 例如：WC + Co WC + Fe WC + TiC + Co TiC + Co VC + Co	一般钢铁	一次加工例 （5 min） $I_p = 20$ A $t_i = 8\ \mu s$ $t_0 = 512\ \mu s$ 二次加工例 （7 min） $I_p = 15$ A $t_i = 1\ 024\ \mu s$ $t_0 = 1\ 024\ \mu s$	30 ~ 50 μm	以 WC + Fe 为例 硬度 1 700 ~ 1 800HV，生成 5 μm 的扩散界面 以 WC + Co 为例 硬度 1 700 ~ 1 750HV，一次加工后（多孔质）再进行二次加工再熔化，生成致密组织，密着性大，即使进行弯曲破坏也不剥离	提高模具、工具的耐磨性。汽轮机、高温气体管道、内燃机的燃烧室、有陶瓷脆性问题的部位
钛系粉末压结体电极	钛系粉末压结体电极	钢材 硬质合金	$I_p = 10$ A $t_i = 2 \sim 50\ \mu s$ $t_0/t_0 = 16$ 数十秒钟至 5 分钟	1 ~ 40 μm	在煤油中放电 一次处理 900 ~ 1 100HV 二次处理 1 600 ~ 2 400HV，耐磨性： 对 SKD11 进行处理后，其耐磨性和硬质合金等同 对硬质合金进行处理后，其磨损量为硬质合金的 1/10 以下	切削工具模具的部分硬化 苛刻磨损环境下的机械部件
	Ti 系微粉 + TiB				一次处理 1 800 ~ 2 500HV， 二次处理 2 500 ~ 5 000HV，耐磨性： 对硬质合金进行处理后，其磨损量为硬质合金的 1/10 以下	
粉末烧结体电极	碳化钛	一般钢铁	$I_p = 8$ A $t_i = 8\ \mu s$ $t_0 = 128\ \mu s$ 4 min	4 ~ 5 μm	硬度增大 3 倍	切削工具模具的部分硬化 苛刻磨损环境下的机械部件

(1) 固体电极油中电火花放电表面改性处理

固体电极油中电火花放电表面改性处理主要有硅电极油中电火花放电表面改性处理、金属钛电极油中电火花放电表面改性处理和细钨丝电极油中电火花放电表面改性处理。毛利尚武教授和斋藤长男教授在研究用硅电极进行大面积镜面电火花加工时，发现了一个有趣的现象，从而萌发了在煤油中用放电进行表面改性的想法，开始了油中放电表面改性处理的研究。他们采用硅电极，峰值电流 $I_p = 1 \sim 4$ A，脉宽 $t_i = 2 \sim 5$ μs，电火花精加工 SUS304（18Cr-Ni 钢），13Cr 钢，SKH-51（高速钢），SKD-61，SKD-11 等 3～5 min 后，获得了王水也不腐蚀的加工表面。对于处理后的 13Cr 钢在空气（炉内）中，900℃加热 20 h，氧化也不向其内部扩展。图 2.8-114 是用硅电极电火花加工过的 SUS304 工件浸泡在王水中 30 min 后的断面 SEM 照片和 ERMA 分析结果，表面已溶入 16% 的 Si，呈玻璃的非晶态，结合强度非常高，进行 30% 的永久变形的反复拉伸实验，也不产生剥离和裂纹。图 2.8-115 用硅电极表面处理后的不锈钢在王水中浸泡 50 min 后的断面照片，可以看出经过处理后的表面，没有任何腐蚀的痕迹。

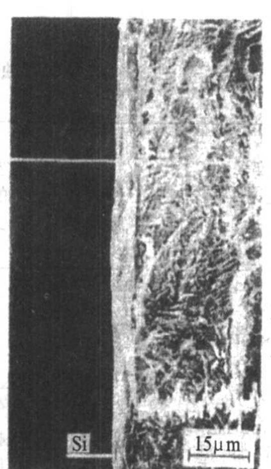
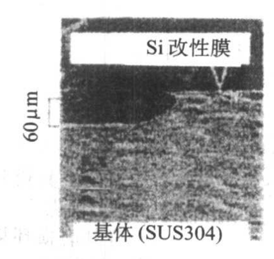


图 2.8-114 用硅电极电火花加工过的 SUS304 工件浸泡在王水中 30 min 后的断面 SEM 照片和 ERMA 分析结果



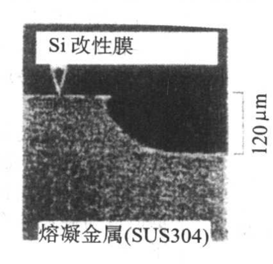


图 2.8-115 用硅电极表面处理后的不锈钢断面照片（王水浸泡 50 min 后）

(2) 压结体电极油中电火花放电表面改性处理

粉末压结电极热传导差，电阻大，电极消耗大，有利于附着工件表面实现电火花放电堆积。用 WC-Co 粉末压结电极电火花放电处理时，处理膜为多空质的膜（一次处理），此时，处理膜和基体结合不牢固。如用铜电极等消耗小的电极对其进行再次加工（即二次处理）的话，可形成比同一成分 WC-Co 硬质合金高 50% 的高硬度处理膜。用 WC-Co 半烧结电极对钢电火花放电堆积可达 3 mm 的厚膜。峰值电流 $I_p = 25$ A，脉宽 $t_i = 16$ μs，脉间 $t_0 = 128$ μs，加工时间 20 min。膜的硬度 1 500HV。

(3) 烧结体电极油中电火花放电表面改性处理

用 TiC 烧结体电极对 S45C 表面处理后的断面照片和电子探针分析结果：加工面积 100 mm^2，峰值电流 $I_p = 8$ A，脉宽 $t_i = 8$ μs，脉间 $t_0 = 128$ μs，工件接脉冲电源的正极。基本主要成分 Fe 从基体到表面层的浓度逐渐减少，在最表面几乎为零，另一方面，Ti 的浓度越接近表面层越高。Ti 扩散渗透到工件材料基体内，越接近表面，硬度越高，最高硬度约为基体的 5 倍。

5.5.3 油中电火花放电沉积表面改性处理的特点

1）结合强度高（附着力强）。生成的处理膜是由基体上逐步生长的膜，基体和处理膜之间没有界限，结合力强，不会引起剥离。

2）在常温下处理。工件在常温下进行处理，没有因热而产生的变形问题。

3）没有工件大小的限制。因为没有必要像其他的处理方法要把工件放入炉中，对工件的大小没有限制，对大的工件进行部分处理是可能的。

4）在基体内部也能形成硬质处理膜。在基体内部也能形成 5 μm 左右的硬质层。即使把隆起沉积的部分去除，也留有硬质膜。

5）和其他的处理方法相比，可以用短的时间进行处理。不需要像其他的处理那样进行前处理。

5.5.4 油中电火花放电沉积的应用

1）切削工具的表面处理　对硬质合金指状铣刀的后刀面进行电火花油中放电表面处理后，后刀面的磨损量为没处理刀具的 1/2 以下。

2）冷冲模的表面处理　处理时间数十分钟，用油中电火花处理后的模具寿命提高 3 倍以上。

3）冷拔模的表面处理　使用寿命比较：以往凸模和凹模的使用寿命都是 1 万次，处理后凸模可用到 5 万次，凹模可用到 7 万次。

4）弯曲模的表面处理　没处理的模具：在其肩部 R 部分粘着工件（SUS304）材料。处理的模具：液中电火花表面处理后直接进行弯曲试验，没有发生工件材料的粘着，获得了 3 倍的模具使用寿命。

5）冷锻模的表面处理　模具材料：SKD11，油中电火花表面处理约 30 min。使用寿命比较：没处理的模具 15 000 次；处理的模具150 000 次，是没处理的 10 倍。

6）挤出模的表面处理　对铝的挤出模具的凹模和芯进行电火花表面处理，模具材料 SKD61。用 PVD、CVD 处理一套模具需要 5 万～10 万日元的处理费。用电火花处理一套模具只需数千日元。电火花处理时间仅数十分钟。

使用寿命比较：用电火花处理后获得了以往模具 3 倍的使用寿命。

6 气体介质中电火花加工

用煤油作工作液，存在着发生火灾的可能性，加工中分解出的气体和蒸气对环境不利，有时操作人员对煤油皮肤过敏，工件的清洗和工作液的维护需要必要的工序和设备，存在着诸多问题。为此，人们进行了非油工作液的研究。首先用水代替煤油作工作液，进行了电火花加工的研究，获得了很高的加工速度，但水作工作液存在着电极的损耗较大，直接影响加工精度和由于存在电解电流使得加工部分周围的工件表面受到电解腐蚀作用等问题，现在还没有达到实用化。

日本东京农工大学国枝正典教授开展了气体中放电电火花加工和气体中线切割加工的研究。气体中电火花加工是把



干燥的气体作为工作介质进行电火花加工，不仅解决了环境和安全的问题，而且还有一些难得的加工特性。

6.1　气体介质中电火花加工原理

图 2.8-116 为气体电火花加工原理，是使用薄壁管作电极，高速气体作加工介质，电极旋转，一边使高速气体从管电极中喷出，一边使其仅在断面产生放电进行电火花加工。气体介质的作用是去除熔化、蒸发的工件材料，并迅速地把其从间隙中排出，还在脉冲和脉冲之间的停歇时间（脉间）吹除等离子体，冷却间隙，恢复绝缘。如果加工气体介质不流动，熔融的加工屑就会再次附着在对面的电极面上，仅在电极和工件之间转移，不从间隙排出。但如果管壁太厚，即使使用气体介质，也容易产生再附着，不能获得很好的加工速度。因此，必须使管的壁厚和放电坑直径是同一数量级的尺寸（0.1 mm 级）。另外，电极应接负极进行加工。其理由是：在煤油中加工，碳附着在正极，保护正极减少损耗，所以把电极作为正极进行加工，但在气体介质中加工中，没有碳的附着现象，正极和负极是按照在间隙中投入的放电能量的分配被蚀除的。根据试验测试结果，精加工窄脉冲时不管是在煤油中加工还是在气体中加工，对所有的放电加工正极分配到的放电能量比负极分配到的放电能量大，所以在气体中精规准加工时，一定要把工件作正极进行加工。

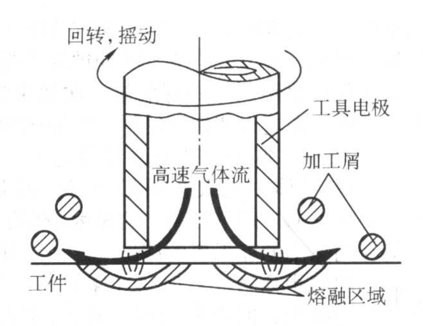
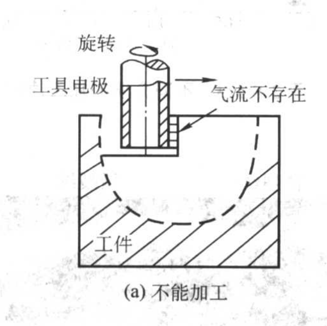


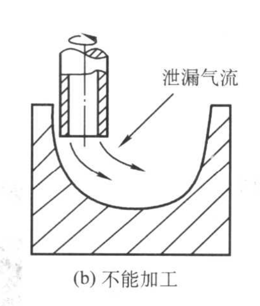
图 2.8-116　气体电火花加工原理

6.2　气体介质中电火花三维形状加工

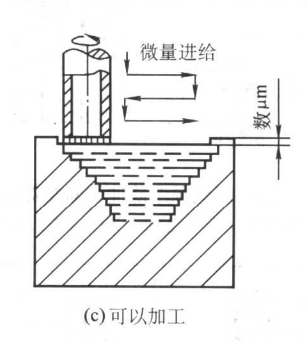
图 2.8-117 是气体中放电三维形状创成加工的示意图。气体中加工，必须供给间隙均匀的气流。如图 2.8-117a 所示那样则无法进行加工，因为把电极侧面作为加工面使用时，电极侧面不存在气流，不能进行加工屑的排出。如图 2.8-117b 所示那样，粗加工结束后，再在气体中进行精加工，因电极和工件间的间隙不均匀，供给的气体从不产生放电的间隙泄漏，也不能进行加工。只有如图 2.8-117c 所示那样，经常地在电极端面均匀地流过气流，就能进行加工。图 2.8-118 是气体介质中电火花三维扫描创成加工的试验样件，电极用的是直径 0.3 mm 的 Cu-W 管，电极损耗极小，仅 0.65%。



(a) 不能加工



(b) 不能加工



(c) 可以加工

图 2.8-117　气体中放电三维形状创成加工的工具轨迹

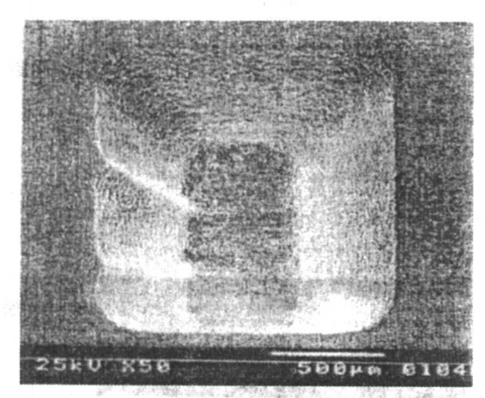


图 2.8-118　气体电火花三维扫描创成加工样件

空载电压：280 V。电容：寄生电容量。

工具电极：Cu－W 电极，外径 0.3 mm，内径 0.1 mm

6.3　气体介质中电火花加工特性

1）电极的损耗率　为对气体中加工的损耗率和煤油中加工损耗率比较，把直径 8 mm，壁厚 0.3 mm 的铜管电极和具有相同断面的碳素钢管进行了对比加工。气体中用正极性，油中用负极性极性加工，对损耗率进行了比较。油中加工是浸在油内的状态下进行加工，没有进行从管中喷射工作液。图 2.8-119 是电极损耗率的对比。由图 2.8-119 可知，在油中加工时，如一般所知的那样，伴随着脉宽的缩短，电极的损耗显著地增大。但在气体中加工时，在所有的脉宽范围内，电极的损耗率都非常地小。在气体中加工能实现电极低损耗的原因是因为熔融、蒸发的工件材料反黏附在管电极的端面。即由于熔点高的钢层覆盖了热导率高的铜管端面，满足了电极低损耗的理想热条件。

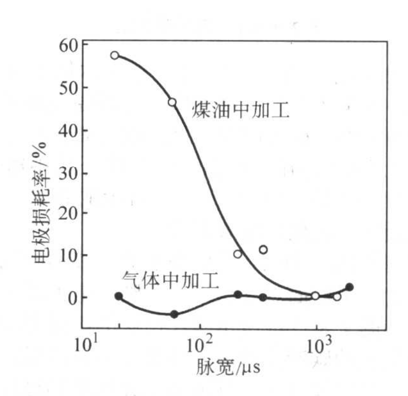


图 2.8-119　电极损耗率对比

电极厚：3 mm。空载电压：280 V。放电电流：20A。

气体：空气 0.5 MPa

2）加工速度　图 2.8-120 是在油中和气体中电火花加工

平均单个脉冲蚀除量的对比结果。因为在气体电火花加工中发生短路的频率特别，所以平均单个脉冲蚀除量是把其加工时间内的蚀除体积用短路以外的有效放电次数来除求得的。不管脉宽多大，气体中电火花加工的平均单个脉冲蚀除量和油中电火花加工的平均单个脉冲蚀除量没有大的不同。图2.8-121是在油中和气体中电火花加工短路率的对比结果。在气体中电火花加工的短路率很高。这是因为在油中电火花加工时，浮游在间隙中的加工屑的浓度高，由于加工屑的介入，产生放电的间隙距离增大，但在气体中电火花加工时，加工屑被高速气流排出，间隙中的加工屑少，间隙距离小。加工速度是用短路以外的有效放电频率和平均单个脉冲蚀除量的乘积求得的。因此，在什么措施也不采用时，气体中电火花加工的速度要比油中电火花加工的速度慢很多。因此，为降低气体中加工的短路率，采取了提高放电电路的开路电压，增大间隙距离的措施。另外，采取了用压电陶瓷驱动提高电极进给控制的频率响应，使短路率减少的措施。其结果如图2.8-122所示，可以使在气体中电火花加工的速度提高到和在油中电火花加工速度相接近的值。

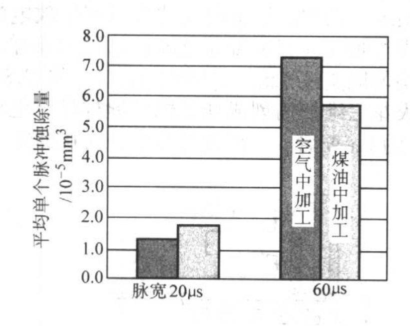


图 2.8-120 平均单个脉冲蚀除量对比

开路电压：280 V。放电电流：20V。占空比：70%

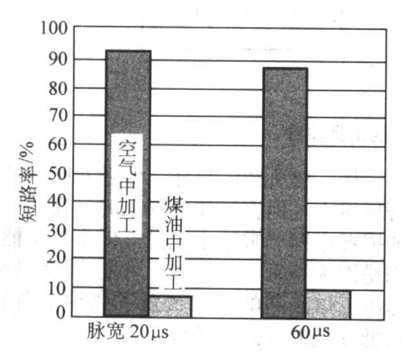


图 2.8-121 短路率对比

3）不同气体加工介质的影响　在气体加工介质中，如果使用和工件发生化学反应的气体，可望提高加工速度。例如，在钢的加工中，如果使用氧气，则由氧化反应而提高加工速度。图2.8-123是在油中和不同气体介质中电火花加工的加工速度对比结果。如图2.8-123所示的结果，供给氧气的加工速度最快，氧化反应效果大。

4）加工变质层　图2.8-124是在油中和不同气体介质中电火花加工的加工断面观察结果。在油中电火花加工的加工面上残留着如图2.8-124a所示叫作白层的熔融再凝固层。工作液热分解生成的碳产生渗碳，使加工面硬而脆，可能形成很多微裂纹。但把氧气作为气体加工介质对钢进行气体中电火花加工时，再凝固层如图2.8-124b所示，非常薄，有望成为加工损伤少的加工方法。图2.8-124c是氮气中加工的再凝固层，厚而疏松。

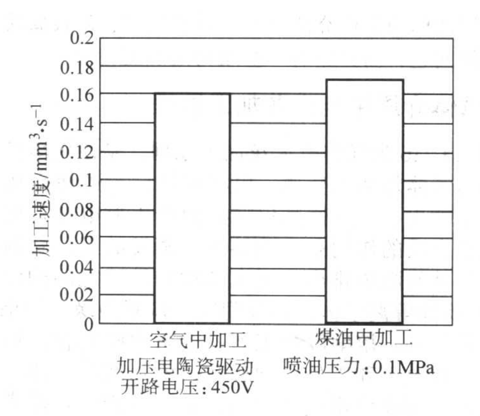


图 2.8-122 在空气和煤油中加工速度对比

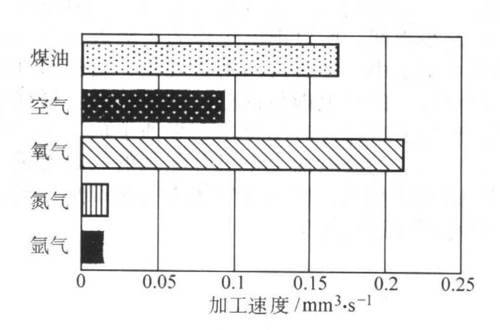


图 2.8-123 不同介质的加工速度对比

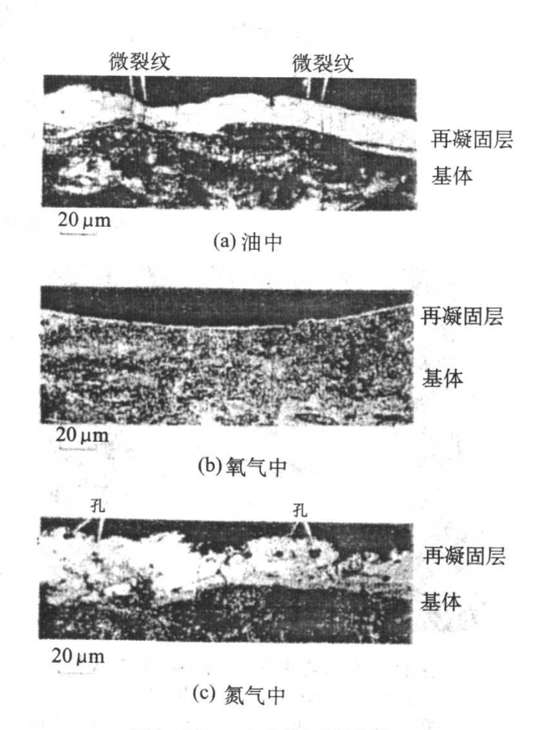


图 2.8-124 加工断面观察结果

空载电压：280 V。加工电流：20 A。脉宽：350 μs。占空比：70%

5）微细加工　在油中电火花加工时，存在着工作液气化或者分解生成的气泡的爆炸膨胀。这时，因工作液具有的惯性和粘性而阻碍其膨胀，气泡的瞬时压力变得非常高。但

在气体中电火花加工时，因由放电产生的气体的体积膨胀少，包围放电点的气体惯性和粘性与油中加工相比，要小一个数量级，所以加工作用力极小。并且加工变质层薄，对微细加工是有利的。图 2.8-125 是气体中 WEDG 加工的微细轴。

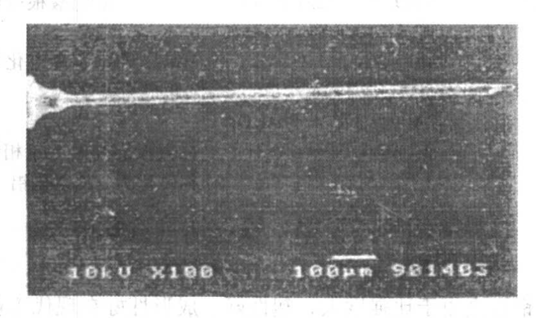


图 2.8-125　气体中 WEDG 加工的微细轴

6.4　气体介质中电火花加工特点

1）工具电极的损耗非常小。
2）选择氧等合适气体介质的种类，可望提高加工特性。
3）加工面的损伤少。
4）加工作用力小，有利于微细加工。
5）能进行表面改性。
6）不会发生火灾。
7）对环境的污染少。
8）不需要加工槽。

气体放电电火花加工安全，不污染环境，电极损耗率非常低，放电加工时的反作用力非常小，有利于微细加工，选择合适的气体时，加工表面再凝固层（白层）非常薄。

7　微弧氧化表面处理技术

微弧氧化表面处理是基于（短电弧）电火花放电和电化学、化学等综合作用使铝及铝合金表面生长、形成一层很薄的多功能的陶瓷膜层，这是近年来国内外竞相研究的一项已实用化的表面处理技术。

7.1　微弧氧化后的表面陶瓷层的功能和作用

1）高硬度、抗磨表层　微弧氧化后生成的陶瓷薄层的硬度和抗磨性，可高于淬火钢、硬质合金，因此，在航天、航空或要求重量轻而耐磨的产品中，可以用铝合金微弧氧化作为气动、液压伺服阀的阀套、阀芯和气缸、液压缸。在纺织机械高速运动的纱锭部件表面可在铝合金表面微弧氧化生成耐磨的陶瓷层。

2）减摩表面　由于微弧氧化后可以使之成为含有微孔隙的陶瓷薄层，在使用传统润滑剂时摩擦系数可降至 0.12～0.06。如果在微孔隙中填充以二硫化钼或聚四氟乙烯等固体润滑剂，则更有独特的减摩擦、磨损效果，可用于汽车、摩托车活塞或其他需低摩擦系数的场合。

3）耐腐蚀表面　能耐酸、碱、海水、盐雾等的腐蚀，可用作化工、船舶、潜水艇、深水器械等设备的防腐层。

4）电绝缘层　电阻率可达到 10^6～10^{10} Ω·cm。很薄的陶瓷薄层，其绝缘强度可达几十兆欧以上，耐高压 100～1 000 V。可以用于既要良好导电，又要良好绝缘性能的精密、微小、特殊机构中。

5）热稳定、绝热、隔热表层　由于表面覆盖有耐高温的陶瓷层，所以铝合金在短时间内可耐受 800～900℃，甚至 2 000℃的高温，可以提高铝、镁、钛等合金部件的工作温度。可用于火箭、火炮等需瞬时耐高温的零部件。

6）光吸收与光反射表层　做成不同性能、不同颜色的陶瓷层，例如黑色或白色，可吸收或反射光能 > 80%，或用于太阳能吸热器或电子元件的散热片。铝、镁、钛及其合金做成彩色的陶瓷表层，可以作为手机外壳等高级装饰材料。

7）催化活性表层　使之生成在内燃机活塞顶部，可把 CO 催化氧化成 CO_2，可减少沉积炭黑和一氧化碳的排放量。

8）抑制生物、细菌表层　微弧氧化时在陶瓷层中加入磷等某些化学物质，可以抑制某些生物生长，可用于防止在海水中船舶表面生长附着海蛎子等生物，或抑制电冰箱内壁生长细菌。

9）亲生物层　陶瓷表层加入钙等对生物亲和、活化的物质，可使植入体内钛合金的假肢表面易于附着生长骨骼、血管和神经细胞的生物组织。

由此可见，在铝、钛等合金表面的微弧氧化生成陶瓷层的技术，有很大的应用及发展前景。

以下主要以铝合金表面微弧氧化生成高硬度、耐磨损的陶瓷层为例，论述微弧氧化表面处理技术的工艺和原理，并探讨其电极间反应等机理。

7.2　微弧氧化表面处理技术的工艺特点

这种微弧氧化表面生成陶瓷层的基本原理是利用 400～500 V高压电源产生电火花在铝合金表面微弧放电，使铝和工作液中的氧在瞬时高温下发生电、物理、化学反应生成三氧化二铝（Al_2O_3）的陶瓷薄层，牢固地生长附着在原铝合金的表面。

经过微弧氧化处理形成的三氧化二铝的厚度可自 1～2 μm至 200 μm，甚至更厚。其基本性能和陶瓷（刚玉）类似，具有很高的硬度（显微硬度 1 000～1 500 HV）和耐磨性，以及耐高温性能，还具有很高的绝缘电阻和耐酸碱腐蚀性能等。此陶瓷层由内向外可以分为过渡层、致密层和疏松层。靠近铝合金基体的是过渡层，它和基体紧密牢固结合，其上是致密层，其主要结构组织是硬度较高耐磨的 α 相三氧化二铝（$\alpha-Al_2O_3$），内有少量的 γ 相三氧化二铝（$\gamma-Al_2O_3$），愈向表层 $\gamma-Al_2O_3$ 百分比愈多，而且含有大量的小气孔，组织粗糙疏松、脆而硬度低，但摩擦时可以含润滑油。以厚 150 μm 的陶瓷层为例，原始表面以下约 75 μm 为致密层；而原始表面以上大约 75 μm 为疏松层，而且愈近表面愈疏松，气孔率愈高，如图 2.8-126 所示。

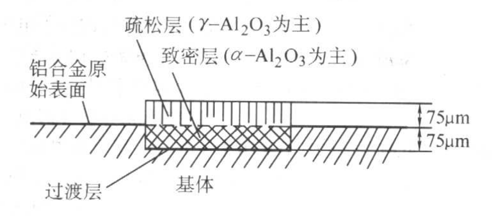


图 2.8-126　生成的陶瓷层与铝合金原始表面的相对位置

图中疏松层和致密层的交界面与铝合金的原始表面大致等高，这一特点，对需后续磨削、研磨加工有尺寸要求的零件是很重要的。当然疏松层和致密层并不是突变而是逐渐过渡的。所含主要物质 $\alpha-Al_2O_3$ 和 $\gamma-Al_2O_3$ 的比例取决于工艺条件，它影响陶瓷膜的各种性能。

7.3　微弧氧化工艺及设备的原理

图 2.8-127 是微弧氧化工艺及设备的原理简图。图中 1 为脉冲电源，2 为需微弧氧化的铝合金工件（接脉冲电源正极），3 为不锈钢槽，接电源负极，4 为工作液，常用氢氧化钾（KOH）添加硅酸钠（Na_2SiO_3）或偏铝酸钠（$NaAlO_2$）等的溶液，5 为吹气搅拌用的压缩空气管。

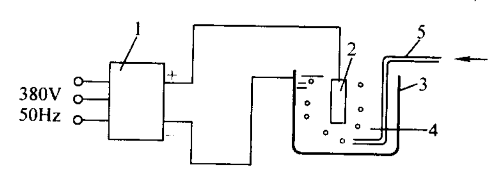


图 2.8-127　微弧氧化工艺及设备的原理简图

加工开始时，在 10 ~ 50 V 直流低电压和工作液的作用下，正极铝合金表面产生有一定电阻率的阳极氧化薄膜，随着此氧化膜的增厚，为保持一定的电流密度，直流脉冲电源的电压也应不断地相应提高，直至升高到 300 V 以上，此时氧化膜为更不太导电的绝缘膜，在工件表面产生暗乳白色的电晕放电。当电压提高到 400 V 左右时，将对铝合金表面产生的绝缘膜击穿形成微电弧（电火花）放电，可以看到表面上有很多红白色的细小火花亮点，此起彼伏，连续、交替、转移放电。当电压升高到 500 V 或更高时，微电弧火花放电的亮点成为蓝白色，更大更粗，而且伴有连续的噼啪放电声。此时微电弧放电通道 3 000℃以上的高温将铝合金表面中熔融 Al 原子与工作液中的氧原子，以及电解时阳极上的铝离子（Al^{3+}）与工作液中的氧离子（O^{2-}）发生电、物理、化学反应结合而成 Al_2O_3 陶瓷层。实际上这些过程是非常复杂的，人们还在不断研究和深化认识过程中。

最简单的直流脉冲电源系将 380 V，50 Hz 的交流电源经变压器变压、升压至 0 ~ 600 V 可调节的交流电，再经半波或全波整流成每秒 50 次或 100 次的正弦波。

为了获得较厚和较硬的陶瓷层，应采用矩形波（方波）输出的单向脉冲电源。最好采用交变的正负矩形波脉冲电源，可更快地获得更厚、更硬的陶瓷层。

7.4　微弧氧化过程的机理——电极间的反应

微弧氧化的微观过程是极为复杂的。今以工作液成分为氢氧化钾（KOH）添加硅酸钠（Na_2SiO_3）或偏铝酸钠（$NaAlO_2$）为例进行探讨。

微弧氧化的电物理化学反应可分为工作液中的反应、铝合金（阳极）反应和不锈钢槽（阴极）反应三个方面，而且是常温的和高温的化学和电化学反应交织在一起的。

工作液中：$H_2O \longrightarrow H^+ + OH^-$　水离解为氢离子和氢氧根离子

$KOH \longrightarrow K^+ + (OH)^-$　氢氧化钾电离

$Na_2SiO_3 \longrightarrow 2Na^+ + SiO_3^{2-}$　硅酸钠分子电离

$NaAlO_2 \longrightarrow Na^+ + AlO_2^-$　偏铝酸钠分子电离

阴极反应：$2H^+ + 2e \longrightarrow H_2\uparrow$　2 个氢离子得到 2 个电子在阴极表面成为氢气析出

阳极反应：$4OH^- \longrightarrow 2H_2O + O_2\uparrow + 4e$　氢氧根电解生成氧气

$Al \longrightarrow Al^{3+} + 3e$　每个铝原子失去三个电子成为铝离子，阳极溶解进入工作液

（常温下）

$Al^{3+} + 3OH^- \longrightarrow Al(OH)_3\downarrow$　铝离子与氢氧根结合成为氢氧化铝

$2Al(OH)_3 \longrightarrow Al_2O_3 + 3H_2O$　在高温下氢氧化铝脱水成为氧化铝

$2SiO_3^{2-} \longrightarrow 2SiO_2 + O_2\uparrow + 4e$　硅酸根电解生成氧气

$4AlO_2^{2+} \longrightarrow 2Al_2O_3 + O_2\uparrow + 8e$　偏铝酸根电解生成氧气

$4Al + 3O_2 \longrightarrow 2Al_2O_3$　铝原子化学和电化学氧化成为氧化铝

$2Al^{3+} + 3O^{2-} \longrightarrow Al_2O_3$

$\gamma - Al_2O_3 \longrightarrow \alpha\text{-}Al_2O_3$　在微弧的高温下 γ 相氧化铝转化为 α 相氧化铝

7.5　微弧氧化技术在铝、镁、钛等合金中的应用前景

铝合金由于比强度大，塑性好，成形性好在现代工业技术中其用量之多，范围之广仅次于钢铁，但是其耐磨性、耐热性、耐蚀性较差，这些问题在航空、航天领域中及兵器制造中表现得更为突出。

采用微弧氧化技术，在铝合金表面上原位生成陶瓷层，厚度可达 150 ~ 250 μm，显微硬度可达 1 000 ~ 1 500 HV，膜层可以获得较硬质合金还高的耐磨性和较低的摩擦系数。用带有这种陶瓷层结构的铝合金部件作成的滚珠，使用寿命能提高十倍以上，汽车、装甲车的发动机的汽缸，活塞长期工作在高温和严重的粘着、摩擦条件下，使用寿命短，采用微弧氧化处理能提高发动机的寿命和效率，经微弧氧化的卫星铝合金高速轴，有很高的耐磨性。

微弧氧化形成的多孔的陶瓷层有很好的耐热性能，有实验表明，300 μm 厚的耐热层在一个大气压下可承受 3 000℃的短时高温，在 100 大气压下的气体介质中，承受 6 000℃的高温达 2 s，得到的耐热层与基体结合牢固，不会因急冷急热在基体与覆层之间产生裂纹，这项技术可用于运载火箭、卫星姿控发动机。在大量使用轻合金的国防工业航空、航天部门中具有重要意义。

微弧氧化技术还可以像前述形成 9 种不同性能和用途的表面层，可进一步扩大应用范围。

此外，镁合金比铝合金更轻和有更好的性能，由于我国镁的储量远大于铝，今后镁合金零件的成本可和铝合金持平，将逐步大量以镁代替铝，所以镁合金表面的微弧氧化技术也将会大量应用。同样，钛合金表面的微弧氧化技术在航天、航空及高档装饰业中也将获得特殊应用。

编写：孟庆国（山东烟台市科技局）
蒋亨顺（北京市电加工研究所）
耿春明（哈尔滨工业大学）
孙昌树（南京江南光学仪器厂）
丁小瑜（南京江南光学仪器厂）
曹凤国（北京市电加工研究所）
白基成（哈尔滨工业大学）
郭永丰（哈尔滨工业大学）
杨晓东（哈尔滨工业大学）



第9章 电火花加工中的防火、技术保安及无害化

1 我国对电火花加工机床的安全和对环境影响的国家强制标准

随着世界文明的发展，如何“以人为本”保证人身安全，保护环境已越来越被各个国家重视，并作为国家强制标准要求各个行业必须执行。我国颁布了对电火花加工机床的安全和对环境的影响制定了《电火花加工机床安全防护技术要求》GB 13567—1998 国家强制标准，也就是说机床的参数、精度可以根据企业生产产品的类型和客户的要求与标准有出入，但与安全有关的国家强制标准必须执行，并在使用说明书中明确提醒操作者在操作中可能会面临的危险，应有危险防范措施和防护方法的说明。表 2.9-1 给出了 GB 13567—1998 标准对电火花成形加工机床的要求。

表 2.9-1 GB 13567—1998 标准对电火花成形加工机床的要求

<table>
<tr><th>序号</th><th>款项</th><th>检验项目和要求</th></tr>
<tr><td>1</td><td>机械安全检查</td><td>1）通过安全评估、设计安全分析等检查机床是否达到了安全设计的要求以及安全措施是否合理
2）机床易接触到的部分是否平整，是否有尖棱、尖角、毛刺等
3）机床是否稳固，重心是否合理。采用开式导轨的机床是否采取了防颠覆措施
4）工作台是否限位可靠
5）主轴是否限位可靠，是否有可靠的失电、失压保护装置
6）主轴头是否限位可靠
7）电极夹持装置和自动交换电极装置是否可靠</td></tr>
<tr><td>2</td><td>安全防护装置和控制系统安全检查</td><td>1）安全防护装置的设置是否合理，其本身刚性、强度、可安装性等是否符合要求，是否增加了附加危险
2）易出现火灾和坐标轴可能撞击的危险性较大的部位是否采取了多种安全防护措施
3）带联锁的防护装置的联锁是否有效、可靠
4）可拆卸的防护装置的质量是否超过 6 kg，防护装置的开启推动力是否大于 40 N
5）控制系统功能是否可靠，是否互相干扰。控制信息载体的中断是否会导致危险
6）易出现误操作的控制器件是否进行了容错设计，是否会出现意外起动的可能性
7）数控机床设置的工作状态选择开关是否一个位置对应一种控制方式或工作状态
8）操纵手轮和手柄的操纵力和安装高度是否符合要求，仪表等的安装高度是否符合要求</td></tr>
<tr><td>3</td><td>电气安全检查</td><td>1）工具电极和工件的电源接线、接线柱的外露部分以及工具电极是否采取了防止人员直接电接触的措施或提出了警告性说明
2）电气箱（柜）以及操作面板等是否达到了所要求的防护等级
3）电气箱（柜）是否采取了防电击保护措施，见 GB/T 5226.1—1996 中的 6.2.1
4）采用 PELV 防护措施是否符合有关要求，见 GB/T 5226.1—1996 中的 6.4
5）电气设备和机床的所有裸露导体件是否接到保护接地电路上，见 GB/T 5226.1—1996 中的 8.2.3
6）机床的每个操作位置是否都设置了急停器件，急停器件的使用和安装是否符合要求，见 GB/T 5226.1—1996 中的 9.2、10.7</td></tr>
<tr><td>4</td><td>其他安全检查</td><td>1）机床上是否提供了可抽、排油雾和烟雾等的装置或接口
2）工作液系统是否有渗漏现象，使用易锈蚀性工作液的机床是否对有关零部件采取了防锈措施
3）机床整机的噪声声压级是否符合要求
4）机床上是否提供了所需要的照明装置或相应的接口</td></tr>
<tr><td>5</td><td>电气试验</td><td>1）保护接地电路的连续性：保护接地电路应按照 GB/T 5226.1—1996 中第 8 章进行目测检查，并对保护导线连接的牢固性检查
保护接地电路的连续性应通过引入来自 PELV 电源的 50 Hz 或 60 Hz 的低电压、至少 10 A 电流和至少 10 s 时间的验证。试验应在 PE 端子（见 GB/T 5226.1—1996 中 5.2）和保护接地电路部件的各不同点间进行
PE 端子和各测试点间的实验电压降不应超过下表中所规定的值
<table>
<tr><td>被测保护导线支路最小有效截面积/mm²</td><td>1.0</td><td>1.5</td><td>2.5</td><td>4.0</td><td>>6.0</td></tr>
<tr><td>最大的实验电压降/V</td><td>3.3</td><td>2.6</td><td>1.9</td><td>1.4</td><td>1.0</td></tr>
</table>
2）绝缘电阻试验：在动力电路导线和保护接地电路间施加 500 V 直流电时测得的绝缘电阻不应小于 1 MΩ
3）耐压试验：电气设备的所有电路导线和保护接地电路之间应经受至少 1 s 时间的耐压试验，工作电压低于 PELV 的电路除外。试验电压为两倍的电气设备额定电源电压值或 1 000 V，频率为 50 Hz 或 60 Hz，由最小额定值为 500 V·A 的变压器供电。在试验时应将不适宜经受试验的元件断开</td></tr>
</table>



续表 2.9-1

序号	款项	检验项目和要求
6	防燃措施试验	1）一般性检查：目测检验机床是否采取了多种防护措施，是否配备灭火器和自动灭火装置接口。使用说明书是否有关于可燃性工作液闪点的要求，是否对有关方法和措施做了说明 2）试验：安全防护措施中使用的液面控制器、液温控制器、自动灭火器等安全装置要进行功能及可靠性试验。应在模拟加工状态下进行
7	信息要求	1）信号和警告装置的设计、配置应便于检查，使用说明书中应有对警告装置的检查规定 2）机床应有产品标志（铭牌），主要包括下列信息：产品名称，制造厂名称，生产日期或出厂日期，编号 3）机床及其附件的注油位置和润滑点应有红色标志。操作件的颜色应与主机不同 4）机床易发生危险的部位（包括防护装置）必须有安全标志或涂上安全色，警告操作者注意各种危险。警告标志应符合 GB 2894—1996 中 1.5 的规定 5）机床电气设备的标志应符合 GB/T 5226.1 第 18 章的规定 6）使用说明书应提供安全方面的要求：a）机床的运输、搬运和贮存信息：机床的安全贮存条件，机床的尺寸、重量和重心位置，机床的搬运说明（起吊设备的施力点），机床的包装安全要求及包装图示标志。b）机床交付试运转的信息：机床固定和基础的要求；装配和安装要求——安装的空间要求等、使用可燃性工作液的机床应考虑工作场所的防火要求；环境条件——温度、湿度和振动；机床动力源的连接说明。c）机床自身的信息：机床产生的噪声数据；安全功能的说明和图表。d）机床使用信息：使用前的准备和检查；使用前和使用中的安全和安全防护、警告标志及说明；起动及运行过程中的操作程序、方法、注意事项及容易出现的误操作和防护措施；使用中可能出现的危险情况；运行中的监测和记录。e）机床维修信息：应提出维修人员进行维修的安全技术要求

2 电火花加工中的技术保安及防火

电火花加工直接利用电能，且工具电极等裸露部分有100～300 V的高电压。高频脉冲电源工作时向周围发射一定强度的高频电磁波，人体离得过近，或受辐射时间过长，会影响人体健康。此外电火花加工用的工作液煤油在常温下也会蒸发、挥发出煤油蒸气，含有烷烃、芳烃、环烃和少量烯烃等有机成分，它们虽不是有毒气体，但长期大量吸入人体，也不利于健康。在煤油中长时间脉冲火花放电，煤油在瞬时局部高温下会分解出氢气、乙炔、乙烯、甲烷，还有少量一氧化碳（约0.1%）和大量油雾烟气，遇明火很容易燃烧，引起火灾，吸入人体对呼吸器官和中枢神经也有不同程度的危害，所以人身防触电等技术保安和安全防火非常重要。

2.1 电火花加工中的技术安全规程

1）电火花机床应设置专用地线，使电源箱外壳、床身及其他设备可靠接地，防止电气设备绝缘损坏而发生触电。

2）操作人员必须站在耐压 20 kV 以上的绝缘物上进行工作，加工过程中不可碰触电极工具，一般操作人员不得较长时间离开电火花机床，重要机床每班操作人员不得少于两人。当人体部分接触设备的带电部分（与火线相连通的部分），而另一部分接触地线或大地时，就有电流流过人体。根据一般经验，如大于 10 mA 的交流电，或大于 50 mA 的直流电流过人体时，就有可能危及生命。当电流流过心脏区域，触电伤害最为严重，所以双手触电危险性最大。为了使电流不至于超过上述的数值，我国规定安全电压为 36 V、24 V及 12 V 三种（视场所潮湿程度而定，一般工厂采用 36 V）。

3）经常保持机床电气设备清洁，防止受潮，以免降低绝缘强度而影响机床的正常工作。若电机、电器的绝缘损坏（击穿）或绝缘性能不好（漏电）时，其外壳便会带电，如果人体与带电外壳接触，而又站立在没有绝缘的地面时，这就相当于单线触电，轻则“麻电”，重则有生命危险。为了防止这种触电事故，一方面人体应站立在铺有绝缘垫的地面上；另外，电气设备外壳常采用保护接地措施，一旦发生绝缘击穿漏电，外壳与地短路，使保险丝熔断，保护人体不再触电。

4）加添工作介质煤油时，不得混入类似汽油之类的易燃物，防止火花引起火灾。油箱要有足够的循环油量，使油温限制在安全范围内。

5）加工时，工作液面要高于工件一定距离（30～100 mm），如果液面过低，加工电流较大，很容易引起火灾。为此，操作人员应经常检查工作液面是否合适。图 2.9-1 为操作不当、易发生火灾的情况，要避免出现图中的错误。还应注意，在火花放电转成电弧放电时，电弧放电点局部会因温度过高，工件表面向上积炭结焦，愈长愈高，主轴跟着向上回退，直至在空气中放火花而引起火灾。这种情况，液面保护装置也无法防止。为此，除非电火花机床上装有烟火自动监测和自动灭火装置，否则，操作人员不能较长时间离开。

6）根据煤油的混浊程度，要及时更换过滤介质，并保持油路畅通。

7）电火花加工间内，应有抽油雾、烟气的排风换气装置，保持室内空气良好而不被污染。

8）机床周围严禁烟火，并应配备适用于油类的灭火器，最好配置自动灭火器。好的自动灭火器具有烟雾、火光、温度感应报警装置，并自动灭火，比较安全可靠。若发生火灾，应立即切断电源，并用四氯化碳或二氧化碳灭火器吹灭火苗，防止事故扩大化。有关自动灭火器的安装使用，可见第 5 章 1.2.2 的（3）节。

9）电火花机床的电气设备应设置专人负责，其他人员不得擅自乱动。

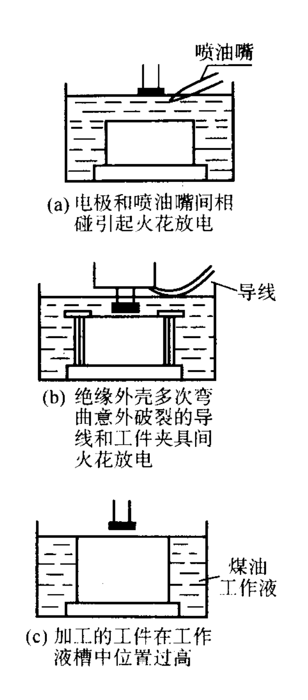
10）下班前应关断总电源，关好门窗。

2.2 正确执行电火花加工安全操作规程

1）应接受有关劳动保护、安全生产的基本知识和现场教育，熟悉本职的安全操作规程的重要意义。

安装电火花加工机床之前，应选择好合适的安装和工作环境，要有抽风排油雾烟气的条件。安装电火花机床的电源线，应符合表 2.9-2 的规定。





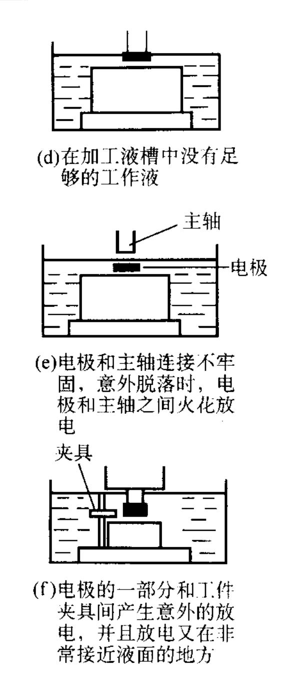


图 2.9-1　意外发生火灾的原因

表 2.9-2　安装电火花加工机床的电线截面

机床电功率/kV·A	2～9	9～12	12～15	15～21	21～28	28～34
电线截面尺寸/mm²	5.5	8.0	14.0	22.0	30	38

2）坚决执行岗位责任制，做好室内外环境安全卫生，保证通道畅通，设备物品要安全放置，认真搞好文明生产。

3）熟悉所操作机床的结构、原理、性能及用途等的知识，按照工艺规程做好加工前的一切准备工作，严格检查工具电极与工件是否都已校正和固定好。

4）调节好工具电极与工件之间的距离，锁紧工作台面，启动工作煤油泵，使工作煤油面高于工件加工表面一定距离后，才能启动脉冲电源进行加工。

5）加工过程中，操作人员不能一手触摸工具电极，另一只手触碰机床（因为机床是连通大地的），这样将有触电危险，严重时会危及生命。如果操作人员脚下没有铺垫橡胶、塑料等绝缘垫，则加工中不能触摸工具电极。

6）为了防止触电事故的发生，必须采取如下的安全措施。

应建立各种电气设备的经常与定期的检查制度，如出现故障或与有关规定不符合时，应及时加以处理。

尽量不要带电工作，特别是在危险场所（如工作地点很狭窄，工作地周围有对地电压在 250 V 以上的导体等）应禁止带电工作。如果必须带电工作时，应采取必要的安全措施（如站在橡胶垫上或穿绝缘胶靴，附近的其他导体或接地处都应用橡胶布遮盖，并需有专人监护等）。

7）加工完毕后，随即关断电源，收拾好工、夹、测、卡等工具，并将现场清扫干净。

8）操作人员应坚守岗位，思想集中，经常采用看、听、闻等方法注意机床的运转情况，发现问题要及时处理或向有关人员报告。不得允许杂散人员擅自进入电加工室。

9）定期做好机床的维修保养工作，使机床经常处于良好状态。

10）在电火花加工场地，应确定安全防火人员，实行定人、定岗负责制，并定期检查消防灭火设备是否符合要求，加工场所不准吸烟，并要严禁其他明火。

2.3　做到岗位责任制和文明生产的各项要求

1）电火花加工工人技术人员应做到岗位责任制和文明生产的各种要求。岗位责任和文明生产的各项要求经车间、班组讨论通过后张贴在墙上，以便督促执行。

2）电火花加工人员的岗位责任，因不同的工厂、企业而可能有所不同。一般电火花加工工人只负责电火花穿孔、成形加工机床的操作和维护，不管此类机床的维修（修理），机床或电源控制柜有了故障后，应请机械或电气维修工来修理。有些较小的企业，不可能把操作、维修等工种分得很清，需维修时只能另请别人。或者有些操作人员一专多能，可把操作和维修工作都兼于一身。少数单位内电火花加工工人还兼数控电火花线切割加工机床的操作及维修，所以往往因地、因人而异。但一经制定岗位责任制，就应努力贯彻执行，如有不完善处，应定期修订。

3）文明生产是指除了保证操作安全之外，还要创造文明的劳动习惯和环境，使生产得以可持续发展。

4）文明生产的具体条例，可举例如下。

① 煤油污染的废棉纱头，擦拭机床、夹具、工件的废布头、废纸片，不可随地乱扔，而应放入金属容器内定期清理。

② 废煤油、过滤器中清除出来的废油渣、炭黑渣等，不可倾注倒入下水道中，而应妥善处理，必要时可和环保部门联系。

③ 临时接的电源插座和电源线，不能放置在人行道上或人脚能踩到的地方，以免绊人或人踩后引起短路“放炮”或触电。

④ 电烙铁、临时照明灯、电风扇、示波器的电源插头，拔下后不能随便放置在地上，以免被人踩坏。示波器的测量探头（高档的探头要上千元一副）和万用表的测笔，不用时应收起，不应拖曳在地上，以免踩坏。

⑤ 机床周围的工作环境，工夹量和工件等物品，不要乱放乱摆，而应安放整齐，文明整洁。

⑥ 车间室外可种些花草树木，室内窗台上可摆放些盆

花，体现出文明生产良好的工作环境。

3　电火花加工的无害化及绿色制造

电火花加工对环境对人体的有害方面表现在：

1）工作液煤油等化学物质的污染，对环境、对人体健康都产生一定的危害；

2）脉冲电源在工作时高频电磁辐射波对周围电器的干扰和对人体健康的危害。

为此，近年来国内外强调了电火花加工的无害化，并进一步提出了“绿色制造”的新理念。

绿色制造理念是伴随着全球绿色革命兴起的一种思维和生态文化，其目标和宗旨是使制造业的产品在设计、制造、包装、运输、使用、维护，直至报废处理和善后处理的整个产品生命周期中将对生态环境的不利影响降至最小，对资源的利用效率增至最大。

从绿色制造的要求出发，电火花加工中首先应做到无害化，其次是应该节约能源和能源的再利用。为此应采取以下措施：

1）采用污染较小的煤油工作液（参见5.2节），大力研究以水代油的水基工作液；

2）加强对煤油等废弃工作液的再生无害化处理和再利用；

3）对高频脉冲电源可能产生的射频电磁波辐射危害采取屏蔽、隔离措施，近年来有的电火花加工机床采取新的造型，加工时将加工区、工作台、油槽等都用金属网板遮盖、隔离、屏蔽起来，不再有射频向外辐射；

4）设计、研制、采用节能、高效、环保型电火花加工脉冲电源。

编写：刘晋春（哈尔滨工业大学）
白基成（哈尔滨工业大学）



参 考 文 献

1 刘晋春，赵家齐，赵万生主编．特种加工．第4版．北京：机械工业出版社，2004
2 郭永丰主编．电火花加工技术．第2版．哈尔滨：哈尔滨工业大学出版社，2005
3 中国机械工程学会电加工学会．电火花加工技术工人培训、自学教材．修订版．哈尔滨：哈尔滨工业大学出版社，2000
4 孟少农主编．机械加工工艺手册：第2卷15章，特种加工．北京：机械工业出版社，1991
5 孙昌树．精密螺纹电火花加工．北京：国防工业出版社，1996
6 苏州电加工机床研究所．电加工及模具杂志，2001～2005年各期
7 [苏] 包比洛夫．电加工手册．谷式，梁春宜译．北京：机械工业出版社，1989



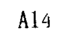


第 3 篇

材料数控电火花线切割技术

主　编　李明辉
主　审　王至尧
副主编　叶　军　周大农　齐从谦　臧法宪
编　写　李明辉　周大农　裴景玉
洪福民　齐从谦　杨晓欣
叶　军　朱　星　李明奇
审　稿　中国材料工程大典编委会

中国机械工程学会
中国材料研究学会
中国材料工程大典编委会


A14

第 1 章　概　　论

1　电火花加工的分类

电火花加工按其工艺过程中工具与工件相对运动的特点及用途不同，大约可以分为如下几类：电火花成形、电火花线切割、电火花磨削、电火花展成加工以及电火花表面强化、非金属电火花加工和电火花刻印等，如图 3.1-1 所示。

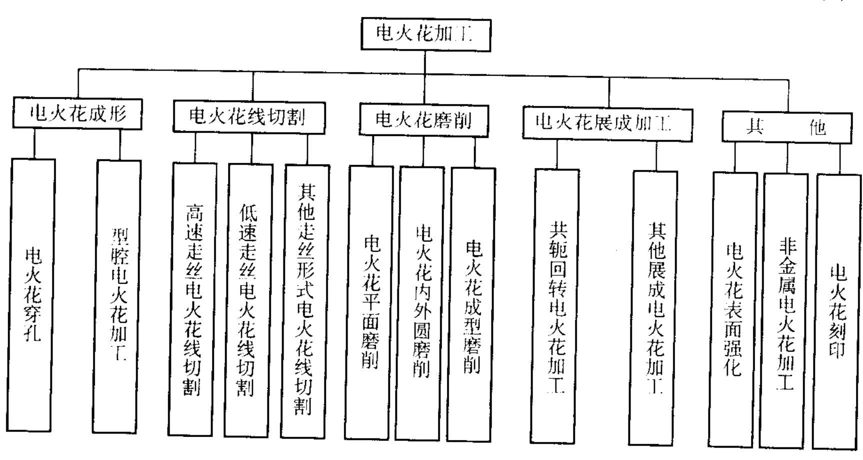


图 3.1-1　电火花加工分类

1）电火花成形　这种加工方法是通过工具电极相对工件作进给运动，在加工过程中将工具电极的形状和尺寸反拷在工件上，从而加工出所需要的零件。它除了工具电极相对于工件作进给运动（这是主运动）外，有时还伴随着一、两个辅助运动，如振动、抬起工具运动、转动、平动、行星运动或轨迹运动等。

.这种加工方法还可以分为电火花穿孔和型腔电火花加工两类，前者一般指贯通的二维型孔的电火花加工，后者主要指三维型腔和型面电火花加工。

2）电火花线切割　这种加工方法的加工原理不是用成型电极把形状尺寸复制在工件上，而是用移动着的线状金属电极丝按预定轨迹进行切割，加工出所需零件。其运动轨迹可以用靠模、光电或数字程序等方式来控制。如果电极丝再作某些辅助运动，还可以切割包括带斜度的任何以直线为母线的复杂零件。

根据其电极丝上下移动的速度不同，又可分为高速走丝电火花线切割和低速走丝电火花线切割。此外，还有电极丝旋转的电火花线切割机以及电极丝的移动速度可以调节的电火花线切割机。不同的走丝方式，电火花线切割机的结构形式及工艺特点也明显不同。

3）电火花磨削　这种方法实质上是应用机械磨削的运动形式进行电火花加工。电火花磨削的工具电极与工件表面之间作相对运动，其中之一或二者作旋转运动，但没有电火花成形时的那种伺服进给运动。

电火花磨削还可分为电火花平面磨削、电火花内外圆磨削以及电火花成形磨削（如电火花成形镗磨和铲磨等）。

4）电火花展成加工　电火花展成加工是利用成形工具电极（通常形状较为简单）与工件电极作相对应的展成运动，逐点进行电火花加工以实现工件的整体成形。目前应用的有电火花共轭回转加工以及棱面展成、锥面展成、螺旋面展成加工等。

5）其他电火花加工　电火花加工除上述四种工艺形式外，还有电火花表面强化、非金属电火花加工、电火花刻印以及其他多种复合加工形式。

电火花表面强化一般以空气为极间介质，工具电极相对工件作小振幅的振动，二者时而短接时而离开，在这一过程中产生脉冲式火花放电，使空气中的氮或工具材料渗透到工件表面层内部，以改善工件表面的力学性能。

非金属电火花加工是指半导体和非导电体材料电火花加工，一般是用高压高频脉冲电源，通过尖状电极施加在所需加工的非金属工件上，并使其产生电火花放电而瞬时释放出大量的热量，从而使工件的局部材料瞬时熔化和汽化，以达到加工的目的。

2　电火花线切割加工原理

2.1　电火花线切割加工基本原理

电火花线切割加工与电火花成形加工一样，都是基于电极之间脉冲放电时的电腐蚀现象。所不同的是，电火花成形加工必须事先将工具电极做成所需的形状及尺寸精度，在电火花加工过程中将它逐步复制在工件上，以获得所需要的零件。电火花线切割加工则不需要成形工具电极，而是用一根长长的金属丝做工具，并以一定的速度沿电极丝轴线方向移动（低速走丝是单向移动，高速走丝是双向往返运动），它不断进入和离开切缝内的放电区。加工时，脉冲电源的正极接工件，负极接电极丝，并在电极丝与工件切缝之间喷射液体介质；另一方面，安装工件的工作台，则由控制装置根据预定的切割轨迹控制伺服电机驱动，从而加工出我们所需要的零件。图 3.1-2 是电火花线切割原理图。

控制加工轨迹（加工的形状和尺寸）是由控制装置来完成的。根据控制方式不同，控制装置又可分为靠模仿形、光电跟踪及数字控制等三种。随着计算机技术的发展，目前电火花线切割加工绝大部分都是采用 CNC（计算机数字控制）控制装置。

电火花线切割加工所用的液体介质，一般为去离子水，也可用煤油。而高速走丝电火花线切割加工则用皂化油的乳化液作工作液。

电极丝的移动由电极丝运丝系统（也称走丝机构）来完



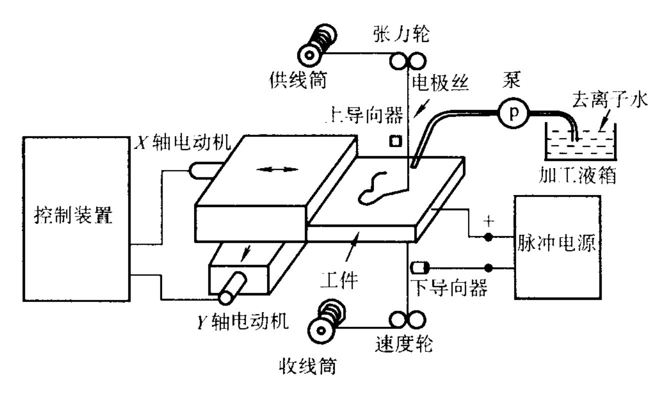


图 3.1-2 电火花线切割加工原理图

成，其收线筒控制电极丝移动速度，而供丝筒控制电极丝的张力。高速走丝电火花线切割机是靠走丝机构的储丝筒正反转来实现电极丝往返移动的。

2.2 电火花线切割加工物理过程

电火花线切割加工的物理过程是非常短暂而复杂的，根据大量实验资料的分析来看，每次电火花腐蚀的微观过程是电动力、电磁力、热动力以及流体动力等综合作用的过程，并可大致分为介质击穿和通道形成、能量转换和传递、电极材料的抛出、极间介质消电离等几个阶段。

电火花线切割加工实际上是一个重复脉冲放电过程，前一个脉冲放电所形成的电蚀产物及放电凹坑必定会影响后一个脉冲的放电过程，因而实际加工时的放电过程会比单个脉冲放电过程复杂得多。但单个脉冲放电毕竟是研究电火花线切割加工机理的基础。为有助于掌握电火花线切割加工的基本规律，并对电火花线切割设备提出合理的要求，仍有必要进一步了解单个脉冲放电的微观过程。

1）单个脉冲瞬时击穿放电过程　电火花线切割加工一般都是在水基工作液（去离子水和皂化油的乳化液，也有用煤油的）中进行的。当脉冲电压施加在电极丝与工件之间时，极间电场将会因电极表面的微观不平而变得极不均匀，极间介电液中的杂质以及弱电解质的极性分子都会在极间电场的作用下向电场较强的方向聚集、结链，进一步引起极间电场的畸变。当极间距离逐步缩小或是脉冲电压不断升高时，极间某处的电场强度将会超过极间介电液的介电强度，使介电液发生雪崩式的碰撞电离，并形成极间放电通道。此刻，极间电阻将在很短时间内从绝缘状态急速下降到数欧姆以下，而电流随即上升，极间电压相应下降到火花维持电压，如图 3.1-3 所示。

极间放电通道实际上是高温、高压的电离气体，其初始压力可达数百甚至数千个大气压。这个内部高压将极力使通道及其周围瞬时形成的分子团（以后发展成气泡）急速扩展，并产生强烈的冲击波向外传播。在放电的初始阶段，气泡和放电通道之间并没有明显的界面，但因放电通道除受到周围液体介质惯性的压缩作用外，还受到它自身电磁场箍束效应作用，因而气泡会在放电过程中与放电通道界面分离并继续扩展，放电通道则被约束成一个细小的通道，其截面甚小，致使通道中的电流密度高达 $10^5 \sim 10^6$ A/cm^2。放电通道是由数量大体相等的带正电和带负电离子以及中性离子组成的等离子体。通道中的正负带电离子在极间电场作用下高速运动时，将发生剧烈碰撞，并产生大量的热量，使通道温度升高到 10 000℃以上。与此同时，阳极表面和阴极表面分别受到电子流和离子流的高速轰击，也将产生大量热量。这样，在两极之间将沿放电通道形成一个瞬时高温热源。

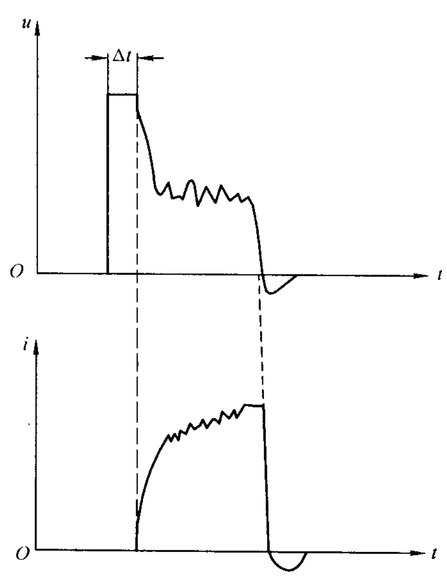


图 3.1-3 矩形脉冲道放电电压及放电电流波形

2）电火花放电时的能量转换　极间介质一旦被击穿放电，脉冲电源就将通过放电通道瞬时释放能量，并把电能转换为热能、动能、磁能、光能、声能以及电磁波辐射能等。其中大部分转换成热能，用于加热两极放电点及极间放电通道，使两极放电点的金属局部熔化或汽化。

热能与电火花线切割加工密切相关，传递（或称分配）给电极表面的主要有下列几种形式：①在电场作用下，带电粒子（电子和正离子）对电极表面的轰击；②电极材料汽化喷爆时所形成的蒸气炬对相对的电极表面的冲击；③放电通道的热辐射；④放电通道中高温气体质点对电极表面的热冲击。

在上述四种传递形式中，带电粒子对电极表面高速轰击是主要的。由于负电子的质量和体积都相当小，在电场作用下能获得很高的加速度和速度，所以在脉冲放电的最初阶段就会有大量的高速电子轰击阳极表面；而正离子则因质量惯性大，加速度小，在短时间内无法获得很高的速度。所以，采用高频窄脉冲电源的电火花线切割加工，都应选用正极性加工，即工件接电源正极，以充分利用电子的轰击作用来提高切割速度。

3）电极表面被蚀材料的抛出　传递给电极表面的能量转化成热能，并在电极表面放电点附近形成一个瞬时高温热源。这个热源的中心处温度最高，并向工件材料内部传导，形成一个温度梯度场，即离放电点中心愈远，温度愈低。根据工件材料的熔点和汽化点不同，使受热材料形成金属汽化、金属熔融、金属固态受热三种情况。由于电极材料的熔

化和汽化过程十分短促，具有爆炸特性。爆炸力将把熔化和汽化的金属材料抛离电极表面，而在电极表面留下一个小凹坑，如图3.1-4所示。

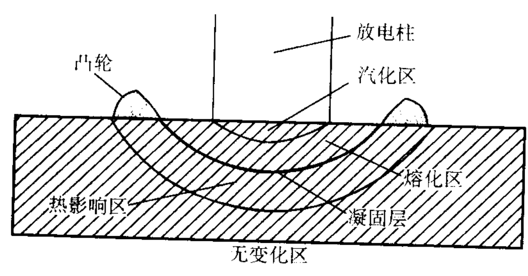


图3.1-4　放电凹坑形成

研究发现，在高速走丝电火花线切割加工情况下，脉冲放电时所形成的电极表面高温热源，不可以简化成一个固定的点热源，而只能简化成快速移动的点热源。这种热源所形成的放电凹坑不是半球形，而是鸭蛋形。移动速度愈快，以及脉冲放电持续时间愈长，其凹坑的长度将愈长。

4）消电离和极间介电性能的恢复　一个脉冲放电结束之后，极间电场急速减小到零，碰撞电离也随之停止，而且放电通道会因消电离过程（即通道中的正负带电粒子复合成中性粒子过程）而使通道中的带电粒子急速减少，并逐渐恢复极间介电液的介电性能。

必须指出，正负带电粒子的复合速度是比较快的，极间电导将在很短的时间内减少。但是，正负带电粒子的复合和极间电导的减少，并不等于极间介电性能的恢复。因为放电后的电蚀产物（含有微粒、气泡给余热等）在短时间内还来不及扩散，介电液的高温及大量的电蚀产物都会降低其介电性能。因此，在电火花线切割加工中，为了保证加工的正常进行，在先后二次脉冲放电之间都应有足够的停歇时间。其最小脉冲停歇时间的选择，不仅要考虑极间介电液的消电离极限速度，而且还应该考虑电蚀产物的扩散和排出，以及放电通道中的热量传散。

5）实际加工时的重复脉冲放电过程　从上面的论述中可以看出，一个脉冲经过击穿放电、能量转换、电极材料抛出以及极间消电离过程之后，便完成了一次电腐蚀，而在工件表面留下一个小凹坑。这个小凹坑是十分微小的，但无数个脉冲放电累积，就可以加工出所需要的形状和尺寸。

此时，人们非常关心实际加工过程中重复脉冲放电是如何进行的。生产实践表明，加工过程中的每个脉冲放电，绝不是简单地在二极之间相对最近的尖端处进行，而是一个复杂的连续过程。

加工时，首先是在二极间介电能力最薄弱的凸起处产生火花放电。由于前一次放电所产生的加工屑及气泡等使放电周围的电蚀产物浓度增大，加上放电后的余热使此处的液温升高，都会降低此处工作液的介电能力，导致第二个脉冲容易在第一个脉冲放电的附近区域再次击穿放电。另一方面，没有发生脉冲放电的附近区域工作液比较干净，介电性能好，不易发生击穿放电。只有当加工区的间隙增大到超出能击穿放电的限度时，重复脉冲放电才会转移另一处相对易击穿的区域进行。正因为如此，电极丝移出加工区域的出口处放电间隙一般要比进口处的放电间隙大。

在实际电火花线切割加工过程中，由于电极材料的不断蚀除，电蚀产物及极间介电液的温度不断增加，加上电极丝的持续进给以及电极丝的振动等，使极间各处的间隙大小及物理状态千变万化，因而极间放电状态也是随机变化的。根据大量的实验资料可以得出：极间距离减小以及电蚀产物浓度增加，都会减小击穿延时时间，或降低击穿初始电压，以致发生极间短路，其规律如图3.1-5所示。图3.1-5右边的放电压波形反映其极间距离较大或介电液的介电性能良好，而左边的电压波形则反映其极间距离小且介电液的介电性能差；最左边的电压波形是极间短路波形。

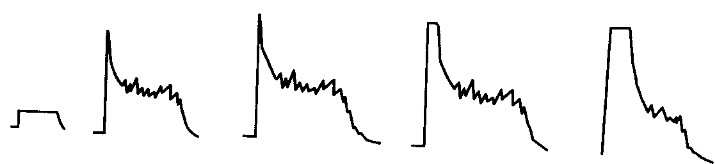


图3.1-5　极间放电电压波形

高速走丝电火花线切割加工因电极丝振动较明显，极间短路是不可避免的。为了抑制电极丝的振幅，一般都采取过跟踪方法控制线切割的进给速度，所以高速走丝电火花线切割加工时的空载波形出现的概率很小。实验表明，在一次放电过程中，也会出现空载、正常放电及短路三种不同波形，如图3.1-6所示。图3.1-6a为短暂延时立即击穿放电；图3.1-6b为击穿放电后产生瞬时短路又发生击穿过程；图3.1-6c是从空载到短路再到正常放电。这是用示波器观察到的放电波形，其发生的机理有待进一步研究。

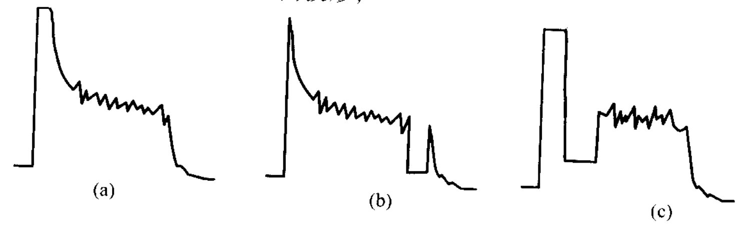


图3.1-6　线切割时的极间电压波形

2.3　电极丝动态特性

（1）电极丝所受的力

在讨论电极丝的动态特性之前，应了解电极丝在加工过程中受到哪些力的作用。根据产生力的原因不同，作用在电极丝上的力可以归纳为下述几种。

1）电极丝轴向拉力　电极丝在移动过程中受到收丝筒拉力和供丝筒反拉力作用，并在电极丝轴向形成张力。在高速走丝电火花线切割加工的运丝系统中，虽然有的也采用了紧丝机构，但绝大多数机床是没有紧丝机构，其张力主要来自电极丝高速移动过程中的摩擦阻力。在卷丝筒绕丝过程中，预紧力愈大，电极丝中的张力也会增大；而且，预紧力增大还会增加电极丝高速移动过程中的摩擦阻力，同样也会增加电极丝的张力。

2）静电场产生的库仑力　当脉冲电压施加在电极丝与工件之间时，由于极间距离很小，极间会产生较强的电场

E，并在电极表面形成一个拉应力：

$$\sigma = \frac{1}{2}\varepsilon_0 \varepsilon_r E^2 \qquad (3.1\text{-}1)$$

式中，ε_0 为真空中的介电系数；ε_r 为极间介质的相对介电系数。

而电场强度 E 是空间和时间的函数，对电极表面积分便可求得静电场对电极表面作用的库仑力。不难理解，在没有击穿放电之前，由于极间电压高，库仑力的作用是比较大的。一旦击穿放电之后，极间电压将降低维持火花电压，会使电极丝所受的横向拉应力大大减少。

3）电磁场产生的电磁力　众所周知，通电导线周围会产生环形磁场，而极间放电通道也必然会产生一个环形磁场区。通电的电极丝在通过这个环形磁场区时，所受到的电磁力为：

$$\boldsymbol{f} = q\boldsymbol{v} \times \boldsymbol{B} \qquad (3.1\text{-}2)$$

式中，$\boldsymbol{f}$ 为电磁力；q 为运动电荷；$\boldsymbol{v}$ 电荷的运动速度；$\boldsymbol{B}$ 为运动电荷所穿越的电场强度。

根据他们的矢量关系不难看出，电磁力在电极上将形成一种压应力，并极力使电极丝推离工件。

4）放电通道的作用力　放电时，不仅放电通道内有很高的压力，而且正离子也会在电场作用下以很高的速度冲击阴极电极丝，形成一个冲击压力。此外，工件放电点的金属加热熔化和汽化时，也会急速膨胀而喷爆出来，有的金属蒸气也将冲击相对的电极丝表面。这两个冲击力的作用，都会将电极丝推离工件。

5）通道周围气泡的作用力　前面已经谈到，放电时介电液因高温分解和蒸发会在放电区产生大量的高压气泡，这些气泡在迅速扩展过程中，也会对电极丝产生一个作用力。

此外，还有介电液的注入以及运丝系统瞬间干扰等，都会对电极丝形成一个作用力，使电极丝的动态特性发生变化。

（2）电极丝的形位变化

电极丝可视为柔软物体，在上述各种力的作用下会发生形位变化。在不考虑运丝系统的瞬时干扰（卷丝筒振动、导轮跳动等）情况下，电极丝的形位变化主要取决于电极丝的张力、静电场的库仑力和加工过程中的放电力（放电力包括电磁力、放电通道作用力、通道周围的气泡作用力等）。电极丝的张力是轴向力，有助于将电极丝拉直而减小其形位变化量。库仑力和放电力则是横向作用力，二者作用方向相反，在未击穿放电时，是库仑力把电极丝拉向工件；击穿放电后，放电力远远大于库仑力的作用而把电极丝推离工件。在整个加工过程中，由于放电力的作用远远大于库仑力的作用，其总的趋势是将两个导向导轮之间的电极丝推离放电区，即向后弯曲并产生一定的挠度。图3.1-7是向左加工时所产生的电极丝弯曲示意图。

在不考虑电极的微观横向振动和阻尼的情况下，电极丝弯曲部分可近似的认为一条弧线，并可用下式描述其挠度：

$$y_1 = \frac{fH}{4F}$$

$$y_2 = \frac{f\ (L-H)}{2F} \qquad (3.1\text{-}3)$$

$$y_3 = y_1 + y_2 = \frac{2fL - fH}{4F}$$

式中，y 为挠度，cm；L 为电极的跨距，cm；H 为工件厚度，cm；f 为放电力，N；F 为电极丝的张力，N。

在高速走丝的情况下，电极丝的张力不是稳定不变的，而是与绕丝的松紧程度及运丝过程摩擦阻力有关。在切割 L_1 方向时，不仅电极丝的跨距会相对减小，而且有利于电极丝的收紧，增大电极丝张力，所以挠度较小；但切到 L_3 方向时，情况则完全相反，不仅跨距相对变大，而且不利于电极丝的收紧，所以挠度较大。电极丝的挠度发生在与加工进给方向相反的方向上，所以在切割直线时虽不会产生明显的加工误差，但在切割曲线或棱角时，则会因进给方向改变而对加工精度产生明显的影响。在放电突然停止时，电极丝将会失去放电力的作用而被张力拉直，极易发生极间短路。

实际上，放电力 f 并非集中在中间的某一点，而是均匀地分布在整个厚度方向上，是一个随空间和时间变化的量 F（x，t），加上工作液的阻尼作用，工件内部的弯曲挠度 y_1 要比式（3.1-3）描述的小很多，而且主要在工件上、下端附近变化，工件内部的电极丝趋近一条直线。试验表明，如果工件上下表面离电极丝导向支点距离不一，电极丝上下两端的偏移量也是不一样的。距离越远，电极丝偏移量越大；距离越近，电极丝偏移量越小。这样，工件内部的电极丝会产生一定的斜度，并在拐角加工或圆柱加工时出现上下端尺寸误差。为此，应尽量缩短上下丝架之间跨距，使电极丝的上下导向支点尽量靠近工件表面。

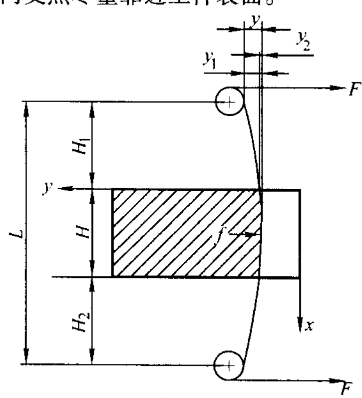


图3.1-7　电极丝的弯曲

（3）电极丝的振动方程

要精确求得电极丝各点的位移，必须用振动方程加以讨论。我们取电极丝上一段 B（x，$x+dx$），假定 B 可以忽略重量的影响，并且是柔软的，则它只受到 A 和 E 的拉力 F_1 和 F_2（如图3.1-8所示）。

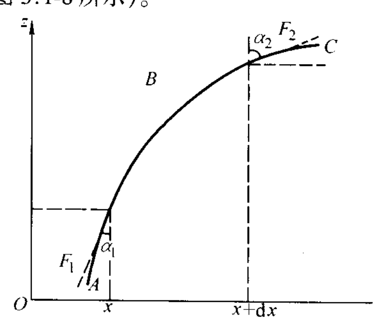


图3.1-8　电极丝的振动

由于波形影响甚微，故假定电极丝的每一小段都没有纵向（即 Z 方向）的加速度，则作用在 B 上的纵向合力为零，即

$$F_2\cos\alpha_2 - F_1\cos\alpha_1 = 0 \qquad (3.1\text{-}4)$$

B 的长度为 $ds = \sqrt{(dx)^2 + (dz)^2}$。在小振动的条件下，$B$ 的长度为

$$ds = \sqrt{(dx)^2} = dx \qquad (3.1\text{-}5)$$

用 ρ 表示单位长度的电极丝质量，则 B 的质量为 ρdx。于是根据 $\boldsymbol{F} = m\boldsymbol{a}$ 便可写出 B 的横向运动方程：

$$F_2\sin\alpha_2 - F_1\sin\alpha_1 = (\rho dx)\frac{\partial^2 z}{\partial t^2} \qquad (3.1\text{-}6)$$

对于小振幅振动，



$$\sin\alpha_1 \approx \tan\alpha_1 = \left.\frac{\partial z}{\partial x}\right|_x, \quad \sin\alpha_2 \approx \alpha_2 = \left.\frac{\partial z}{\partial x}\right|_x + \mathrm{d}x \qquad (3.1\text{-}7)$$

这样，在小振幅条件下，B 段的纵向平衡方程和横向的平衡方程为：

$$\begin{cases} F_2 - F_1 = 0 \\ F_2 \left.\dfrac{\partial z}{\partial x}\right|_{x+\mathrm{d}x} - F_1 \left.\dfrac{\partial z}{\partial x}\right|_x = \dfrac{\partial^2 z}{\partial t^2}\rho \mathrm{d}x \end{cases} \qquad (3.1\text{-}8)$$

式（3.1-7）说明 $F_1 = F_2 = F$，即拉紧力不随空间位置而异。所以方程（3.1-8）可写成

$$F\left(\left.\frac{\partial z}{\partial x}\right|_{x+\mathrm{d}x} - \left.\frac{\partial z}{\partial x}\right|_x\right)/\mathrm{d}x = \rho\frac{\partial^2 z}{\partial t^2} \qquad (3.1\text{-}9)$$

上式左边就是 $F\dfrac{\partial^2 z}{\partial x^2}$，这样 B 段的运动方程就成为

$$\rho\frac{\partial^2 z}{\partial t^2} - F\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} = 0 \qquad (3.1\text{-}10)$$

B 虽然是代表一个小段，但在选取 B 段时并没有给定任何特殊条件。所以其他各段的运动方程也都如此。式（3.1-10）就是电极丝作微小横向振动时的运动方程，通常简称弦振动方程。

如果考虑外力作用，即电极丝在振动过程中还受到库仑力、放电力及液体介质的阻力等作用，就成了受迫振动情况。现假定作用在单位长度电极丝上的横向力为 $f(x, t)$，则方程（3.1-6）应改写成

$$F_2\sin\alpha_2 - F_1\sin\alpha_1 + f(x, t)\,\mathrm{d}x = (\rho \mathrm{d}x)\frac{\partial^2 z}{\partial x^2}$$

而式（3.1-9）应相应的改为

$$\rho\frac{\partial^2 z}{\partial t^2} - F\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} + f(x, t) = 0$$

如果 $f(x, t)$ 可以确定，就可以利用其定解条件求出上述方程的解 $z(x, t)$。

在电火花线切割加工过程中，电极丝的振动是不可避免的。刚切入工件时，振动特别明显，特别是在高速走丝情况下，甚至可以不用任何测试仪器都可以清楚看到；但在切入工件之后，便受到液体介质和电蚀产物的阻尼以及瞬间短路的抑制，振幅大大减小。用闪光测频仪对切缝里的电极丝振动进行测试可以发现，放电引起的振动经一次振动衰减，其振动就变得甚微。实践表明，电火花线切割加工时，实际振幅是较小的，即使在高速走丝情况下，也能控制单边放电间隙在 0.01 mm 以下。

电极丝的振动不仅影响加工精度，还容易引起断丝。但振动也有助于扩大平面放电间隙，改善排屑条件。在实践中应根据具体加工条件，合理控制和利用电极丝的振动特性。一般来说，拉紧力（张力）愈大，横向振幅也愈小，振动频率则愈高。

（4）电极丝振动的检测

在实际测量时，是用图 3.1-9 所示方法来测定切缝中电极丝的。试件上预先加工一个宽度小于 1 mm 的水平切缝，以便让激光束通过。因为该缝隙上下都有很长的电极丝处于加工状态，所以缝隙中这一小段能够较好地反映出加工区能对电极丝振动产生阻尼作用，但也阻碍激光束的通过，为测量方便，往往关断液体介质的供给管路，在"干切"情况下进行检测。其测量结果是会偏离实际数值，但所得的规律还是能反映出实际情况的。

图 3.1-10 为实际检测和分析系统框图。检测时，激光器发出的激光束经电极丝和光学系统后，将电极丝的形位清晰地成像在光栅上。通过光窗的光通量就会因电极丝形位变化而发生变化，而这种变化被光电传感器转变为电信息，经放大后存在模拟磁带机，也可用示波器直接观察。对振动情况进行分析时，可把放大后的信号经 A/D 变换输入计算机进行分析处理。分析处理结果则由打印机和绘图机输出。

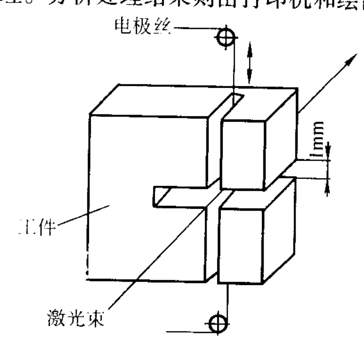


图 3.1-9 测定加工区电极丝的振动

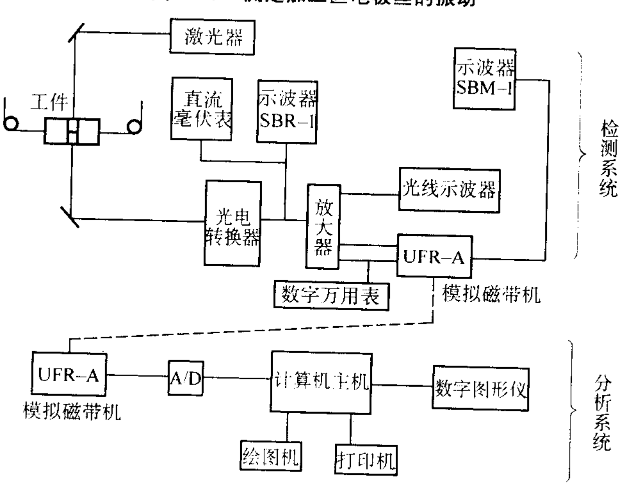
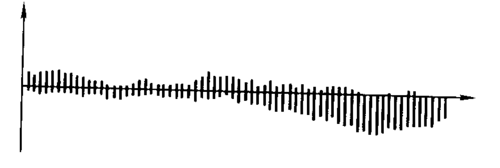


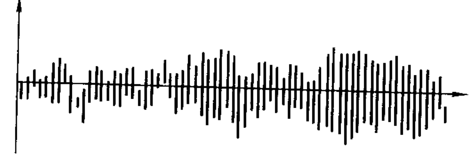
图 3.1-10 实际检测系统与分析系统框图

利用上述检测和分析系统对电火花线切割加工情况进行测试分析，可以得到如下几个结论。

1）高速走丝电火花线切割机床的电极丝振动要比低速走丝电火花线切割机床的电极丝振动大。即使是在同一台高速走丝电火花线切割机床上，电极丝移动速度高的（走丝速度为 9.8 m/s）也要比电极丝移动速度低的（走丝速度为 1.3 mm/min）振动大 1～2 倍，如图 3.1-11 和图 3.1-12 所示。高速走丝机床的电极丝振动大，是由于导轮和轴承的径向跳动和轴向窜动以及润滑脏物、线架和储线筒的振动等随机因素引起的。

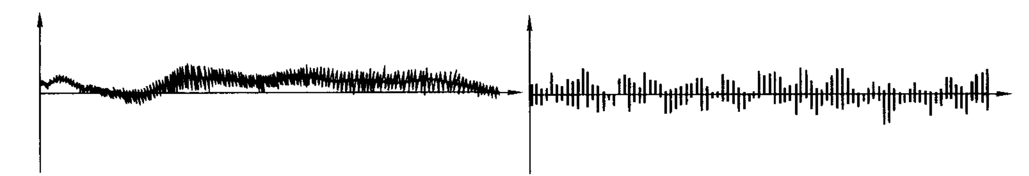


(a) 走丝速度为1.3m/min



(b) 走丝速度为9.8m/min

图 3.1-11 不同丝速下开路时振动波形



(a) 走丝速度为1.3m/min　　(b) 走丝速度为0.3m/min

图 3.1-12　不同丝速下加工时振动波形

2）加工时的电极丝振动受到一定的抑制。图 3.1-13 是高速走丝电火花线切割加工的空载与加工时的电极丝振动信号检测图。从图中不难看出，加工时的电极振幅明显小于空载时的振幅，从而验证了前面所说的高速走丝情况下因导轮、轴承、储丝筒等多因素引起的振动会受到各种阻尼（含瞬间短路）而被抑制，使振幅减小。

3）加工条件对电极振动影响电火花线切割时的电极丝振动，不仅与其走丝速度有关，而且还与其他加工条件密切相关。图 3.1-14 所示为不同加工规准下电极丝振动测试结果，图中粗规准加工的电极丝振幅要大于精加工时的振幅。根据这一测试结果就不难理解，用小规准进行切削加工时，容易获得较高的加工精度和表面质量，但振幅减小又会影响放电间隙而增加排屑困难。



(a) 开路时电极丝的振动信号



(b) 加工时电极丝的振动作号

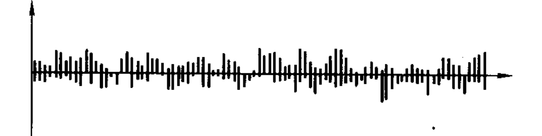
图 3.1-13　空载与加工时电极丝的振动信号

测试结果还表明，工件厚度增加以及液体介质的粘度增加，都会增加电极丝振动的阻尼，减小电极丝的振幅而增大电极丝的跨距又会使电极丝振幅增大。

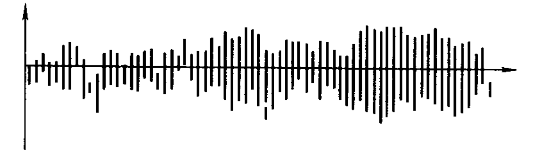
在实际加工时，控制进给的跟踪速度对电极丝的振动影响很大。如果跟踪速度慢。极间电压波形会出现很多空载电压，短路电压则明显减少。此时的放电间隙较大，电极丝振幅也大；如果跟踪速度快，极间放电电压的空载成分大大减少而短路波形明显增加，此时的电极丝振动将受短路抑制而减弱，有助于提高加工稳定性，避免断丝现象的发生。



(a) 精加工 t_i=4μs　t_0=16μs　I=0.4A



(b) 精加工 t_i=10μs　t_0=30μs　I=0.5A



(c) 精加工 t_i=30μs　t_0=90μs　I=0.5A

图 3.1-14　粗、中、精加工时电极丝振幅随加工电规准变化

（5）电极丝移动速度与排屑

在电火花线切割加工过程中，除工件材料会被电腐蚀外，工具电极丝也不可避免地会受到电腐蚀，这就要求电极丝连续移动，使新的电极丝不断地进入加工区，而被电腐蚀过的电极丝则及时离开加工区。电极丝的移动速度（也称走丝速度）一般为每分钟几毫米至几百毫米，以确保不断丝。

在生产实践中人们发现，电极丝的移动还有助于液体介质进入窄缝加工区，并将电蚀产物从窄缝加工区内排出，提高加工稳定性。所以，人们都希望尽可能的提高它的走丝速度。但低速走丝电火花线切割机都是采用单向移动，电极丝使用一次之后就作为废品弃用，过高的走丝速度会增加电极丝的用量及其生产成本，故走丝速度都在 5 m/min 以下；而高速走丝电火花线切割机采用了往返走丝机构，电极丝可多次经过加工区重复使用，允许走丝速度提高到 5～11 m/s，但过高的走丝速度不仅会影响走丝系统的工作稳定性，而且往返转换的停电时间会相对增加，也不利于加工速度的提高。

提高走丝速度可以帮助液体介质进入窄缝加工区，改善排屑条件，是因为液体介质在窄缝中的流动受电极丝移动的剪切流动作用所支配。众所周知，线切割加工的切缝是向进给的反方向敞开的，而敞开的一面基本上被电蚀产物所堵塞（采用黏性较大的乳化液作液体介质时更是如此），加上液体介质流动方向垂直于敞开的反向，因此可以近似地认为液体介质是在环形管中流动。又因为两极表面经放电腐蚀后是微观凹凸不平的，故可认为液体介质的流动是在粗糙管壁中的黏性液体流动。电火花线切割加工所用的液体介质（特别是高速走丝所用的乳化液）都具有一定的黏性，它在切缝中流动时电极丝的移动将带动液体介质流动。这种流动的根源就在于流层间的黏性摩擦作用。假定液体介质在切缝中是均匀的，即液体间的动力黏度是一个常数 μ，液体介质的流动符合牛顿内摩擦定律。经上述假设和分析，我们就可以进一步讨论走丝速度与排屑的关系。

1）液体介质剪切应力 τ 的分布　首先，我们在液体介质（即切缝中的工作液）中取一半径为 R、厚度为 dr、张角为 θ、高度为 L 的弧形微元体，如图 3.1-15 所示。

由于微元体是力平衡的，由层流模型可知，微元体的两侧剪切力的合力等于零，$\sum F_z=0$。所以

$$\sum F_z = \tau r\theta - (\tau + d\tau)(r + dr)\theta = 0 \qquad (3.1\text{-}11)$$

整理式（3.1-11），并略去高阶无穷小的 dτdr，积分可得

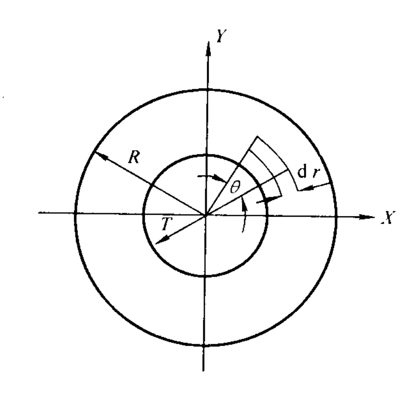


图 3.1-15 切缝中的微元体

$$\tau=\frac{C_0}{r} \qquad (3.1\text{-}12)$$

式中，C_0 为积分常数。

2）液体介质的剪切流动速度分布 由牛顿内摩擦定律可得

$$\tau=\mu\frac{\mathrm{d}\nu}{\mathrm{d}r} \qquad (3.1\text{-}13)$$

将式（3.1-12）代入式（3.1-13）可得

$$\mathrm{d}\nu=\frac{C_0}{r\mu}\mathrm{d}r \qquad (3.1\text{-}14)$$

将上式两边积分可得

$$\nu=\frac{C_0}{\mu}\ln r+C_1 \qquad (3.1\text{-}15)$$

式中，C_0、C_1 为积分常数。

设电极丝的移动速度为 ν_0，电极丝的半径为 r_0，切缝宽度为 $2R$，则式（3.1-15）的边界条件为：当 $r=r_0$ 时，$\nu=\nu_0$；当 $r=R$ 时，$\nu=0$。

将边界条件代入式（3.1-15），就可得到液体介质的速度分布：

$$U=\frac{\nu_0}{\ln(r_0/R)}\ln\frac{r}{R} \qquad (3.1\text{-}16)$$

3）液体介质剪切流动的流量 Q 对式（3.1-16）进行面积积分，便可得到单位时间内液体介质剪切流动的流量 $Q_z=\int\nu\mathrm{d}S$。流体介质在窄缝中流动时通过的面积 $\mathrm{d}S=2\pi r\mathrm{d}r$，则有

$$Q_z=\int_0^R\frac{U_0}{\ln(r_0/R)}\ln\frac{r}{R}2\pi r\mathrm{d}r \qquad (3.1\text{-}17)$$

对式（3.1-17）进行定积分得：

$$Q_z=\pi U_0\left[\frac{r_0^2-R^2}{2\ln(r_0/R)}-r_0^2\right] \qquad (3.1\text{-}18)$$

4）喷射冲液压差流动的流量 Q_p 假设喷射冲液在切缝入口与出口之间形成压力差为 Δp，根据压差定义及哈根－泊肃叶方程可得切缝中液体介质的流速分布 U_p 为

$$U_p=\frac{\Delta p de^2}{32l\mu} \qquad (3.1\text{-}19)$$

式中，de 为等效直径，$de=2(R-r_0)$；l 为切缝长度，即工件厚度；μ 为液体介质运动黏度。

由式（3.1-19）得压差流动的流量为

$$Q_p=\mu_p S=\pi(R^2-r_0^2)\frac{\Delta p de^2}{32l\mu} \qquad (3.1\text{-}20)$$

式中，S 为液体介质流动的管道截面积；R 为切缝半径；r_0 为电极丝半径；Δp 为切缝上下端压差；de 为等效直径，$de=2(R-r_0)$；l 为切缝长度，即工件厚度；μ 为液体介质运动黏性系数。

液体介质的流量大，所带出的电蚀产物也愈多，即排屑条件好。根据上面的讨论，我们可以得出如下结论。

1）液体介质压差流动的流量 Q_p 与压差 Δp 成正比，与单面放电间隙 $\delta=R-r_0$ 平方成正比；与工件厚度 l 成反比，与液体介质的黏度成反比。用低速走丝机加工薄工件时，采用喷射冲液的方法可以增加液体介质在切缝中的流量，改善排屑条件。

2）在加工厚工件时，压差流动的流量较小，排屑作用甚微；而剪切流动的流量 Q_z 与工件厚度无关，并与电极丝的移动速度及切缝尺寸成正比。工件愈厚，切缝中液体介质的剪切流动所占的比重也愈大。

3）改善电火花线切割排屑条件的有效方法是提高走丝速度，增大电极丝直径，扩大放电间隙。

3 电火花线切割加工的特点及分类

3.1 电火花线切割加工特点

电火花线切割加工与其他电火花加工一样，其加工速度与工件材料的力学性能（硬度和韧性等）无关，常用来加工淬火钢、硬质合金。磁钢以及不锈钢等金属材料，也可以加工金刚石、陶瓷之类的非金属材料。电火花线切割的工艺特点可以归纳如下：

1）它是用一根细长（ϕ0.03～0.35 mm）的金属丝作工具电极，而不需要制成特定形状的成形电极；

2）加工对象主要是平面形状，当机床上装有能使电极丝上、下导向器相对偏移的装置之后，还可以加工锥面或上下面异形的以直线为母线的复杂曲面；

3）因电极丝直径很细，切缝很窄，有利于材料的利用，还适合加工细微零件，如采用 ϕ0.03 mm 钼丝作电极丝，切缝可以减小到 ϕ0.04 mm，内角半径小到 ϕ0.04 mm；

4）电极丝细长，并不断更新（单向低速走丝）或往复使用，电极丝的丝径损耗很小，因而加工精度很高；

5）常用水基工作液（去离子水或乳化液），不会发生火灾，有助于实现无人看管下的连续运转；

6）依靠数控系统的丝径偏移补偿功能，可以方便地调节凹、凸模的配合间隙，依靠锥度切割功能还可以实现凹、凸模一次同时加工；

7）自动化程度高、操作方便、加工周期短、加工成本低。

3.2 电火花线切割加工的应用范围

电火花线切割加工不仅有很多工艺特点，而且非常经济有效，现已广泛用于国民经济各个生产制造部门，并成为一种必不可少的工艺手段。目前主要用于冲模、挤压模、拉伸模、塑料模、电火花成形用的工具电极以及各种复杂零件加工等。由于电火花线切割机的加工速度和精度迅速提高，已达到可与坐标磨床相竞争的程度，加上它所能加工的内角半径很小，使许多采用拼结构和曲线磨削加工的复杂模具和零件，现都改用电火花线切割加工。而且制造周期缩短 3/4～4/5，成本降低 2/3～3/4，配合精度高，不需要熟练操作工人。随着计算机控制技术的发展，电火花加工不仅可以加工各种复杂形状平面的直壁零件，而且还可以加工包括大锥度、上下异形面在内的立体形状的复杂模具和零件。按用途不同可将它的适用领域分为平面形状金属模具加工、立体形状金属模具加工、电火花成形用的工具电极加工、微细加工、工具与量具的轮廓加工、试制品及零件加工等，见表 3.1-1。

表 3.1-1 电火花线切割加工技术的适用范围

分类	适用范围
二维形状模具	冷冲模（冲裁模、弯曲模和拉深模），粉末冶金模，挤压模，塑料模
三维形状模具	冲裁模落料凹模，3 维型材挤压模，拉丝模
电火花成形加工电极	微细形状复杂的电极，通孔加工用电极，带斜度的型腔加工用电极
微细精密加工	化学纤维喷丝头，异形窄缝、槽，微型精密齿轮及模具
工量具轮廓	成形刀具外形，各种样板，凸轮及模板
试制品及零件加工	试制品直接加工，多品种、小批量加工，几何形状复杂的零件，材料试片
特殊材料零件加工	半导体材料、陶瓷材料，聚晶金刚石、非导电材料，等硬脆材料的微型零件的加工

3.3 电火花线切割机分类

（1）按加工轨迹的控制方法分类

电火花线切割机按其轨迹控制方法不同可分为靠模仿形电火花线切割机、光电跟踪电火花线切割机及数控电火花线切割机三大类。

1）靠模仿形电火花线切割机　靠模仿形控制是最初采用的控制方法，它是利用一块薄铜片做成与被加工零件形状尺寸完全一致的靠模板，加工时粘附在工件表面，中间衬垫一块绝缘薄板。电极丝与靠模板之间加上数伏的直流电压，当电极丝在切割过程中一旦与靠模板接触（或脱离）控制系统立即获得信号，使电极丝离开（或接近）靠模板。电极丝就是这样在控制系统作用下，沿着这块靠模板边缘“时而接触时而离开”地实现仿形加工。这种控制系统结构简单，制造维修方便，加工精度可达 ± 0.01 mm。但由于转弯拐角点地自动切换尚未很好解决，加上高精度的复杂靠模板不易制作，所以局限性很大，目前极少采用。

2）光电跟踪电火花线切割机　光电跟踪控制原理是利用光电头把放大了的图纸信号（一般比工件放大 5、10、50 倍）转换成电信号，使加工轨迹按图纸所画的图形轨迹运动。这种控制方法不受工件形状复杂程度限制，工作可靠，适合于加工尺寸小而又难于 CNC 编程的形状复杂模具零件。

光电跟踪电火花线切割机的控制方式，根据光源的结构形式及跟踪原理不同又可分为光通量比较法和光电脉冲相位法。图 3.1-16 所示的光电跟踪电火花线切割机整机系统方框图，其控制方式为光电脉冲相位法。光电头产生的光环照射跟踪图上的墨线，跟踪图下面与光电头作同步运动的硅光电池就产生脉冲信号，这一信号经整形放大驱动执行电机带动光电头移动；光电头的移动又继续扫描墨线产生脉冲信号，驱动执行电机运动。同时，这一信号经自整角发送机送给切割台的自整角接收机驱动切割台作同步比例运动。因此，跟踪台上光电头的光环沿跟踪图运动的轨迹，也就是切割台比例运动的轨迹，从而完成对工件的仿形加工。

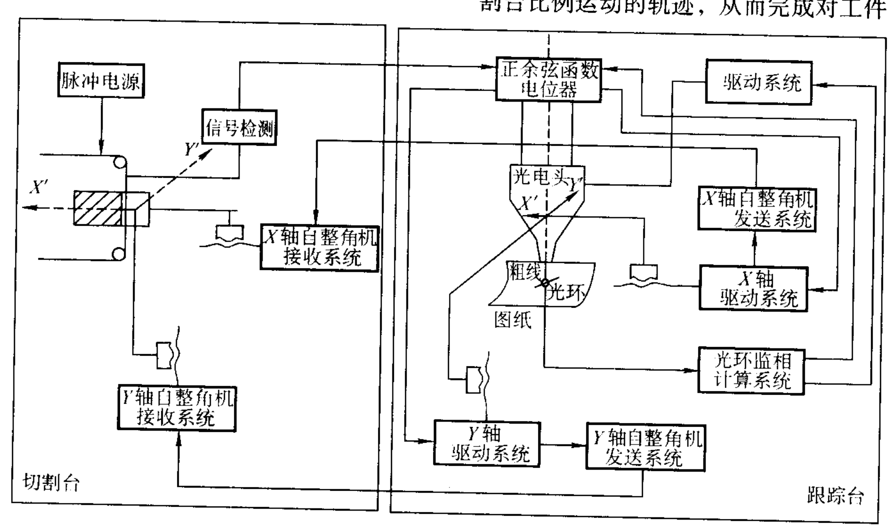


图 3.1-16　光电跟踪电火花线切割机床整机系统框图

3）数控电火花线切割机　数控电火花线切割机控制系统是由一台专用计算机构成的。它根据使用者预先编制好的加工程序来自动控制电火花线切割的加工过程，可以切割 x、y 平面上由直线和圆弧组成的图形，在一定精度要求下可用若干段直线或圆弧来近似加工非圆曲线或列表点曲线。

数控系统原理方框图如图 3.1-17 所示，主要由下列五大部分组成。

① 运算器　是由存储器、全加器、变补器、延迟寄存器和若干运算控制器组成。电火花线切割机在加工过程中，全部运算均通过该运算器来完成。在输入时，它借助于三位延迟寄存器对数码进行运算。

② 控制器　是由时标脉冲发生器、操作控制、运算判别回路组成的。它综合运算器、存储器等部分的有关要求，发出各种控制信息，使运算器和存储器部分按一定顺序自动

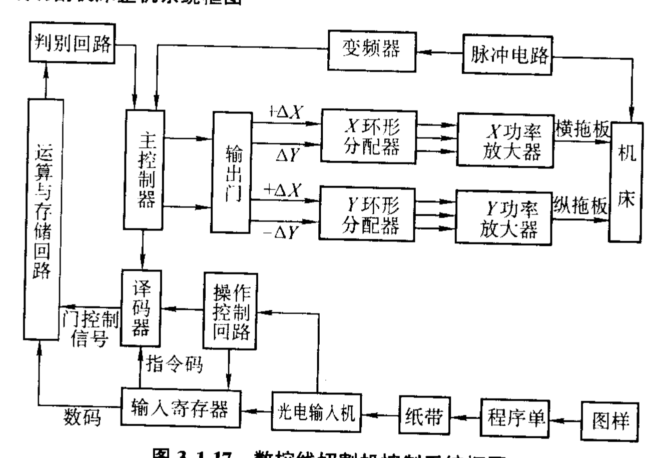


图 3.1-17　数控线切割机控制系统框图

而协调地工作。

③ 译码器 主要是把数码寄存器或计数器中的信息"翻译"出来，以控制其他部件的工作。

④ 输入回路 其任务是将数据、指令及某些标志信息输送到机器中去。

⑤ 输出回路 其任务是将输入的曲线类型及插补运算判别比较函数符号的结果，综合译成机床工作台滑板的运动。

随着计算机技术的飞速发展，数控方式的优越性愈来愈突出，它不仅可以方便地编制各种复杂的加工程序，实现丝径的偏移补偿和加工图形的缩放，而且还可以通过齿隙补偿和螺距补偿，获得很高的加工精度。此外，数控系统的控制功能强还为实现四轴联动加工和智能化加工创造了条件，有助于电火花线切割加工过程自动化程度进一步提高。目前，数控电火花线切割机已基本上取代了另外两种类型，独霸了电火花线切割的市场。

(2) 按电极丝移动方式分类

电火花线切割机按其电极丝移动方式不同，可以分为高速走丝电火花线切割机、低速走丝电火花线切割机和自旋式电火花线切割机三种。这三种机型的电极丝移动方式不同，会使其机床结构、操作方式及其工艺效果等产生较大的差别。

1) 高速走丝电火花线切割机 高速走丝电火花线切割机（如图3.1-18）所示是我国在20世纪60年代研制成功的。由于它结构简单，性能价格比较高，深受广大用户的欢迎，并在我国得到迅速发展。至2003年底，年产量已达25 000台，广泛用于全国各行业的生产制造部门，并出口到世界各大洲。这类机床的电极丝是绕在储丝筒上，以高速（6～11m/s）往返移动，一直使用到电极丝损耗后不能使用或因老化变脆为止。电极丝为 ϕ0.08～0.2 mm 的钼丝或钨钼丝。工作液为以皂化油为主的乳化液或去离子水等。由于电极丝高速移动能将工作液带进切缝内的加工区，起到介电和冷却作用，同时还能将加工区的电蚀产物带出切缝，以确保加工稳定进行。走丝速度高决定了它排屑条件好，有利于大电流高速切割和大厚度工件加工；但走丝速度高也会引起运丝系统的振动和磨损，增大电极丝的振幅，严重影响加工精度和表面粗糙度。目前所能达到的加工精度一般为 ± 0.01 mm，表面粗糙度 R_a 1.25～2.5μm，虽可满足一般模具的加工要求，但对于要求更高的精密加工就感到比较困难。

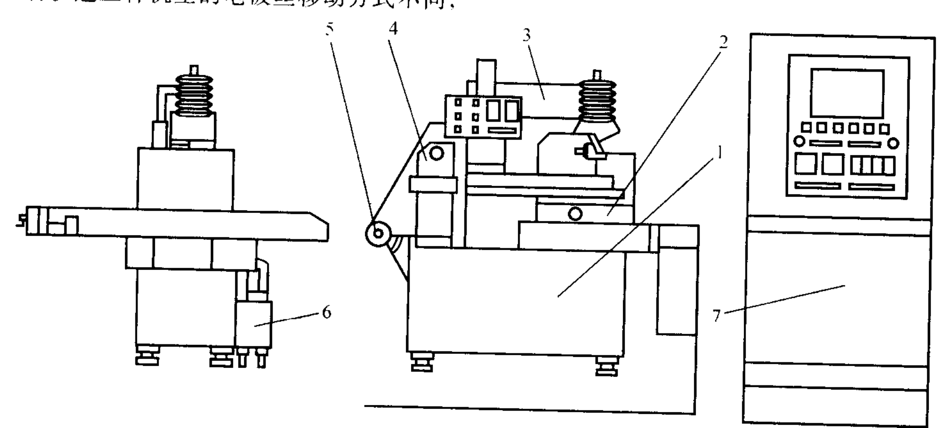


图 3.1-18 高速走丝数控电火花线切割机床

1—床身；2—工作台；3—丝架；4—储线筒；5—紧丝电动机；6—工作液循环系统；7—数控箱

2) 低速走丝电火花线切割机 低速走丝电火花线切割加工机如图 3.1-19 所示。电极丝通过走丝系统以低速（15 m/min 以下）通过切缝加工区单向移动，其收丝筒控制电极丝移动速度，供丝筒控制电极丝的张力（参见图 3.1-19）。电极丝为黄铜丝、镀锌铜丝或钼丝，直径一般为0.15～0.35 mm，微细加工时也有用 0.03 mm 细金属丝的。工作液用去离子水或煤油。低速走丝系统运行平稳，电极丝的张力容易控制，加工精度比较高，一般可达 ± 0.005 mm，最高可达 ± 0.001 mm；低速走丝的排屑条件较差，加工大厚度工件相对困难一些，而且电极丝消耗量很大，成本较高，通常用于精密模具和零件的加工。

3) 自旋式电火花线切割机 自旋式电火花线切割机的电极丝以 1 500～3 600 r/min 转速绕自身轴线高速自旋，并以0.02～0.12 m/s 速度沿轴线往复移动。该机型的整体结构如图 3.1-20 所示，它由机床主体、电介液槽及电器控制柜等组成。

在机床主体部分，电极丝在水平方向进给并旋转；工件装夹在工作台上相对电极丝作 y，z 方向运动。电气控制柜一方面向极间放电间隙供给高频脉冲能量，另一方面由数控系统控制 y，z 轴运动轨迹。这类机型目前虽处在进一步完善和推广使用阶段，但已经显示许多特性。

① 电极丝的高速自旋不仅有电火花磨削特征，而且还有助于将电蚀产物从放电加工区排至加工后的切缝内，保证电火花线切割加工的稳定进行。

② 机床的运丝系统平稳，且张力恒定，可以进行多次切割，有助于提高加工精度和表面粗糙度。

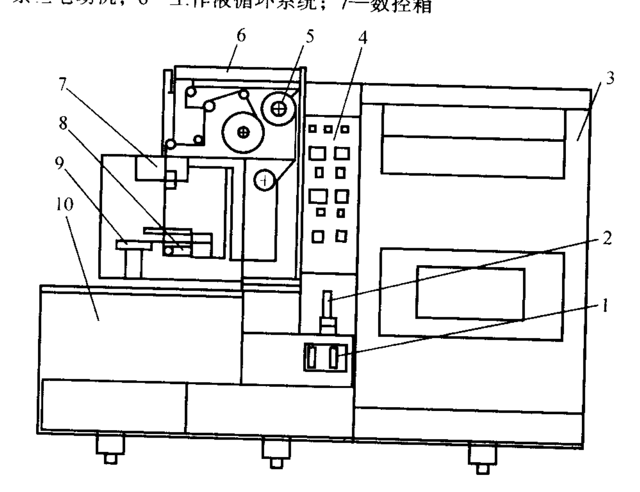


图 3.1-19 低速走丝数控电火花线切割机床

1—工作液流量计；2—画图工作台；3—数控箱；4—电参数设定面板；5—走丝系统；6—放电电容箱；7—上丝架；8—下丝架；9—工作台；10—床身

③ 极丝往复移动可使它多次重复使用，大大降低了电极丝的消耗量及生产成本。

④ 该类机型多次切割加工后的最高加工精度可达 ± 0.005 mm，最佳表面粗糙 R_a 为 0.36μm。



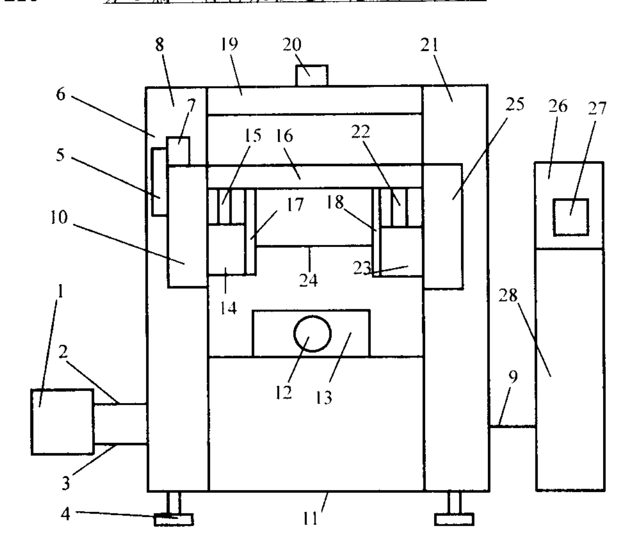


图 3.1-20 自旋转式电火花线切割机床的总体结构

1—乳化液槽；2—电介液供应管；3—电介液回收管；4—校平调节螺钉；5—轴同步运动传送标；6—V带；7—主电动机；8—纵向导向左立柱；9—电缆；10—电极丝运动机构托架；11—机床机座；12—Y轴运动电动机；13—工作平台；14、15—电极丝转动及进给装置；16、17、18—电动丝运动机构托架；19—横梁；20—Z轴运动电动机；21—纵向导向右立柱；22、23—电极丝转动及进给装置；24—电极丝；25—电极丝运动机构托架；26—控制箱；27—显示屏；28—脉冲电源

4 电火花线切割技术的研究现状及发展趋势

4.1 电火花线切割技术的研究现状

电火花线切割技术经过近半个世纪的发展，现已十分成熟，并达到了相当高的工艺水平：最大的切割速度可达 500 mm²/min，最佳表面粗糙度达 R_a0.1～0.2 μm，加工尺寸精度可控制在几个微米之内，高速走丝电火花线切割机还能稳定切割 1 m 的超厚工件。为了提高电火花线切割工艺水平，提高机床自动化程度和智能化程度，降低对操作者的技术要求，满足市场的不同要求，国内外电加工研究人员及制造商都在积极采用现代研究手段和先进技术进行深入开发研究，向电火花线切割加工信息化，智能化和绿色化方向发展。

1）脉冲电源　电火花线切割加工时，一般采用水作工作液，放电时的电解腐蚀影响大，特别是对于硬质合金的加工，电解作用会使工件表面形成一层电解变质层，使硬度下降，模具寿命缩短。为克服电解变质层的影响，国外厂商推出无电解电源：日本 Sodick 公司的 BS 电源、日本 Mitsubishi 公司的 AE 电源、FANUC 公司的 AC 电源、及 Seibu 公司的 EP 电源和 Charmilles 公司的 SI 电源等都是无电解电源。其加工原理是加工总可以在不产生放电的加工时间内（脉冲间隔）施加一反极性电压，加工时仍采用以往的正极性加工，这样可以使漏电流控制到最低限度。采用无电解电源后，生产效率约比传统的电源要降低 30%，最大的生产效率约为 260～270 mm²/min，加工表面粗糙度 R_a 达 0.1～0.2 μm。目前的无电解电源可以进行从粗加工到精加工的整个加工过程，但单独使用此电源所能达到的表面粗糙度略低于微精加工电路（如日本三菱公司的 FS 电源、瑞士 Charmilles 公司的 MF 电源）所达到的最佳指标，其优点在于消除了电解变质层，减少裂纹，提高表面硬度，大大提高了工件寿命，减少静修次数。此外，无电解电源在加工铝、黄铜、钛合金等材料时，工件的氧化情况也有很大的改善。

电火花线切割加工件的表面缺陷，不仅指电解变质层，而且还包括热变质层、微裂纹、镀覆层及铁锈等方面。产生这些缺陷的原因除电解作用外，还有放电高温的热影响、水的腐蚀、工件材料性能等，其中热影响是最根本的。为了改善工件的表面质量，Charmilles 公司的对策是在等能量的原则下，将脉宽变窄拉高，使放电能量集中，让材料以汽化方式蚀除。由于汽化热大大高于熔化热，作用时间被大大缩短，因此进入材料基体的热量很少，热影响层就很薄，热应力下降，阻止微裂纹的生成。其 SI 电源就是根据此原理设计的，再加上平均加工电压为零，控制了电解作用。这样配备了 MF 微精加工电路的 SI 电源保证了表面完整性。用过去的电源加工时，变质层为 4～5 μm，用 SI 电源及细丝加工时，变质层为 1μm 以下。据介绍，日本三菱公司的 AEII 电源加工后的表面也不产生微裂纹，可以获得与磨削加工几乎一样的表面。

2）机床机械系统　为提高加工精度和改善控制性能，电火花线切割机床的机械部分不断地得到新的改进，有的已将电火花线切割加工技术提高到一个新的境界。

在电火花精加工中，放电间隙仅为几微米至几十微米，传统的伺服电机和滚珠丝杠构成的伺服系统在指令脉冲和实际位置间存在数十毫秒的滞后，因此实现稳定、平滑的伺服并保持较高的精加工效率是十分困难的。日本 Sodick 公司创造性地在电火花线切割机床的伺服系统上使用直线马达驱动。并采用直线马达伺服系统，省去了丝杠传动环节，在伺服运动中去除了中间环节的损失和响应的滞后。特别是在静加工过程中，仅数毫秒的高速响应和大于 1g 的加速性能，确保了可实现电火花微观过程小间隙的连续性，使精加工脉冲的利用率大幅度提高。同时，采用直线马达伺服系统的运动方式决定了机床必须采用直线位置反馈元件作为位置检测环节，构成了一个全闭环系统，直接检测滑板的直线位移，其中没有丝杠的螺距误差，没有丝杠和联轴器的反向间隙误差，避免了传动链零件的磨损等干扰因素。直线运动的导向也采用了与直线电机高响应速度相适应的滚动导轨，这些措施的综合使用，实现了机床的精密控制和长期的精度保持性。

瑞士的 CHARMILLES 公司的超精密电火花线切割机床 ROBOFIL-2030SI 在机械系统上有自己的新意：该机采用新的走丝系统，电极丝在带运丝机构中作横向摆动，大大减少了带磨损的出沟问题，使丝张力和走丝速度更加稳定，而且带的使用寿命至少有 1 000 h。在机床走丝的两个带运丝机构中，进丝处设置了一个带有偏摆沟槽的转向轮，电极丝进入带啮合时就有了约 10 mm 左右的横向摆动。该机构简单，下导向器处的收丝带，由一套传动机构推动带作缓慢的横向摆动，由于带的磨损极小，故更换 0.1 mm 的细丝时不需要更换带，仅需要更换上下导向器，用 5 min 就可以做好；此外，张力控制由原来的磁粉离合器改为电磁式制动器（即直流张力电机），使性能更稳定，工作更灵敏。以上两项新措施，大大提高了走丝张力和速度的稳定性，这对保证加工精度，特别是斜度切割精度有重大意义。

此外，在自动穿丝和自动重穿丝方面亦有重大进展。穿丝前除了进行加热、拉细、变硬的准备处理外，在保护套管下端还设有一细脖子，当电极丝经上述处理后，因为此处散热较慢，会过热拉断，形成自然的尖锥，从而不再需剪切机构，也不会有剪切毛刺，影响穿丝的成功率。机床配置了起始孔搜索功能，若加工的起始孔有偏离，经搜索后找到孔、穿丝、再排除电极丝与孔壁短路的可能，接着放电切割达到要求的起始孔位置。这样，用 ϕ0.1 mm 的电极丝，可穿过 ϕ0.16 mm 的起始孔 50 次，成功率 100%，一次穿丝时间不超过 30 s。重穿丝结构亦有很大改进，卷丝电机和气缸都外置，废丝圈最后用水流冲入一个网底容器中，避免了废丝圈造成电极丝与工件短路的情况出现。重穿丝可以在切缝中进



行，不必回到起始孔位置，其范围已扩大到直径为 0.07～0.3 mm 的电极丝。过去细丝在切断时会反弹脱离上导向器，需要操作者帮忙。现在在送丝电机处加了一个气动刹车，由于电机不能反转，使 ϕ0.07 mm 的细丝可实现自动重穿丝没有困难。电极丝横向移动的原理同样也可用在碎丝机构中。由于可用刀刃全长切断丝，不是集中在一点，故刀刃寿命大大延长，两年才需要更换。导电块压丝采用摆动而不再是前后移动，导电块可在摇臂上横向调整，所以可用很多次。上述各项改进虽然都涉及一些"小结构"，但都十分巧妙，给用户带来的好处不小。

另一个重大改进是用恒温水冷却立柱。ROBO FIL2030SI 机床的工作液（高纯水）有一套温控装置，控制水温在 20℃±5℃范围，用专门的循环水泵使其川流不息地在立柱冷却管道中通过，不管室温如何变化，立柱温度不变。例如室温在一昼夜中，从 20℃升到 27℃时，过去切割 80 mm 高的齿条，齿性对基面的垂直度将变化 6 μm，现在，立柱恒温，垂直度不变。瑞士的 Agie 公司为减少机床精度的变化对加工精度的影响，而采取了统一的温度场，其机床装有两套温度控制系统，分别控制加工区与 U、V 轴两轴的温度，及电源箱、机床与室温的空气冷却。两套温控系统通过温度计进行调整，使温差不超过 1℃。

在电火花线切割加工中，由于电极丝的滞后弯曲变形，在角度加工时会产生塌角误差，特别在小角度与小圆弧切割时表现更为明显，Agie 公司在这方面拥有称为 Pilot 的专利技术。它利用一套光学系统测量电极丝受力时弯曲变形量，由 CNC 系统进行补偿，其分辨率为 2 μm，采样频率为每秒 15 次，这样不仅提高了角度的加工精度，而且使加工速度比一般的拐角对策提高了 60%。

3）断丝机理　一般认为，断丝主要是由于火花放电集中引起电极丝温度过高而熔断，这一点与检测到的断丝先兆是一致的。因此从热传导理论研究电极丝的温度分布成为研究断丝机理的主要研究途径。M. Jennes、R. Snoeys 和 W. Dekeyser 建立了热模型，并分别用解析法和有限差分法计算了不同加工条件下电极丝上的温度分布。S. Banejee 对 Jennes 的模型进行了修正和简化，新模型考虑了脉冲时间内放电通道宽度方向上的热能扩散。研究的结果表明：断丝前的热载荷超过平均值；脉冲宽度和丝径的大小对丝温的影响大；热对流系数对丝温的影响大，冲液的状态对避免断丝十分重要；焦耳热和丝振的作用可相对忽略。

K. P. Rajurkar 等也进行了这方面的研究，但所获得的热传导计算结果与实际加工结果相差较大，只能是定性或粗定量地反映电极丝上的温度分布和蚀除速度。通过对电流和电压的检测估算得到了电极丝上的温度分布，结果显示电极丝的平均温度大约为 100℃，有时甚至更低，这是因为能量在电极丝上的分配没有确切的数据，放电通道半径尚未找到精确的计算公式。此外，他们还研究了冷处理后的电极丝与加工性能之间的关系，使用在 77 K 的低温中存放 24 h 后的电极丝进行切割，试验表明，断丝的可能性降低了 30%。

对于等能量脉冲电源，研究的结果表明断丝有两个重要先兆：①火花放电概率在短时间内（50 ms～2 s）突然上升，由于放电频率过高使电极丝局部温度很高，进而导致断丝。②正常火花概率的下降，异常放电概率逐渐上升也是断丝的一个先兆，由于丝损上升，电极丝变细，最终被拉断。对于等脉冲电源，断丝的先兆为出现几乎没有开路和断路的几个到几百个脉冲全部是火花放电脉冲。K. P. Rajurkar 等还指出加工过程中工件厚度的突变是引起放电集中的主要原因之一，因此需要在线检测工件厚度的变化，调整相应的工艺参数，控制电极丝的进给速度和放电频率，在不断丝的情况下得到较佳的切割速度。

由于断丝先兆持续的时间短，防断丝控制的实时性要求高，因此控制参数的选择非常重要。在线切割加工中，脉冲间隔能够快速调节向放电间隙输入的能量，同时脉冲间隔变大，使放电间隙电蚀产物排除的时间增加，能有效改善放电集中现象，使断丝发生的机会大大降低，这使脉冲间隔成为防断丝控制的首选控制参数。目前由于断丝的原理还不十分清楚，从热传导理论出发研究的工艺参数与断丝之间的关系还很不成熟，对电极丝温度的预测与实际情况有较大差别，这使得对断丝进行主动控制难以实现。因此目前断丝控制的研究都是基于对放电间隙状态的准确预测，用反馈控制的方法来进行防断丝。控制模型采用的控制方法有自适应控制模型和采用智能控制模型来对脉冲间隔进行控制，有的对伺服进给量进行在线控制以改善放电间隙的状态。总之，断丝问题的研究还有待于进一步深入。

4）加工控制　电火花加工控制系统可以认为是电火花加工机床的灵魂，伺服进给控制系统和脉冲电源加工规准的选择及控制直接关系到产品的质量、加工效率和加工稳定性。由于电火花加工过程的复杂性和随机性，对加工控制系统提出很高的要求，对于控制系统的研究一直在进行。目前各种控制方法差异主要在于控制参数、评价标准以及控制算法的不一致。电火花线切割加工中，由于检测量与控制量之间的非线性关系，使得经典控制理论难以取得较好的效果，因此从 20 世纪 80 年代起，现代控制理论特别是自适应控制理论被研究人员用于电火花加工的加工控制系统。针对高速走丝线切割加工控制，Huang. Y. H 等在分析机床的加工工艺特点后，提出了步进电机进给步周期的递推算法，使在切割厚度变化情况下也能很好地跟踪，获得最佳切割速度。Zhang. W 等用自校正控制算法来进行控制伺服进给，并通过试验确定系统的预报模型为二阶模型，控制模型的参数采用在线递推估计法。试验表明这些控制算法在一定的实验条件下取得了较好的加工效果，对不同的加工条件都有较好的适应能力。

对于慢走丝电火花线切割加工，火花放电概率的高低和波动不仅关系到加工速度，同时与加工稳定性和断丝问题是密切相关的。拉扎连科等人认为不同厚度工件的最佳火花频率不同，因此必须实现工件厚度的实时检测。为在线识别工件厚度，他们建立一个多输入参数模型，由间隙电压量、伺服进给量和实时检测的火花概率来识别，这使得在伺服进给不稳定时也能有很高的精确性。他们还通过实验建立了厚度与最佳火花概率关系的公式，当工件厚度识别后，最佳的火花概率也就确定了。在控制火花概率上，他们采用了自适应控制理论来建立了一个一阶控制模型，模型参数同样采用在线递推辨识以适应放电加工的随意性。研究中的试验表明，该控制策略使在变厚度切割条件下也能始终维持最佳的火花频率，保持高速切削，同时有效避免断丝的发生，这在电火花线切割加工自适应控制研究是相当先进的。

M. T. Yan，Y. S. Liao 等是较早在电火花线切割加工控制系统中运用模糊逻辑控制理论的。同建立在精确数学模型的经典控制理论和现代控制理论想比，模糊控制更适合于多输入非线性、时变或具有高度不确定性的系统的控制，而且控制器的规划设计可以充分利用熟练操作人员及专家的经验；此外将自适应和学习能力引入到模糊控制中，使模糊控制规则、隶属函数和模糊量化在控制中可自动调整和完善。这些特点都非常适合电火花加工控制。在此基础上，他们对脉间和进给伺服参考电压采用模糊自适应控制。机床在精加工、粗加工和加工中改变初始的最佳设定值三种情况下进行试验。试验表明，与传统的控制相比较，采用模糊控制技术具有良好的自适应能力，控制器可以由放电间隙状态的检测来感知加工条件的变化，从而自动调节控制参数，如同一个熟



练的机床操作人员，试验研究取得了满意的结果。

在拐角切割控制加工上，W.J.Hsue，S.S.Lu 等在控制策略上有新的成果，他们提出了“放电角”的新概念，并利用此概念分析了常见拐角加工的材料去除率，指出在拐角切割且当保持恒速伺服进给时，材料蚀除量是在不断发生变化的，不像在进行直线切割时，材料蚀除量是恒定的，因此在切割拐角时，向放电间隙输入的放电能量要与材料的蚀除量相一致，否则拐角的切割由于过多的放电能量而形状精度下降。他们采用经典的 M 序列测试系统响应的方法研究了伺服进给量与火花放电频率之间的关系，并用极点配置法涉及了伺服控制器模型；同时用 PI 控制器来调节脉冲间隔，以此来综合控制拐角切割时向放电间隙输入的能量。可贵的是：在控制放电能量的同时，他们还对电极丝的张力进行控制，当切割拐角时增加电极丝的张力来改善由于电极丝弯曲而使精度下降的现象，研究中的试验结果表明这种全面控制策略取得了相当好的加工精度。

4.2 我国电火花线切割技术的近期进步

1）机床品种多样化、年产量稳步增长　多年来，我国生产的数控电火花线切割机一直是单一的高速走丝线切割机。近几年来，为了满足市场需要，又开发生产了自旋式电火花线切割机、走丝速度可调的电火花线切割机（含高低双速走丝电火花线切割机）以及低速走丝电火花线切割机等。机床品种的多样化可以满足用户的需要，扩大数控电火花线切割加工的应用范围。

高速走丝电火花线切割机是我国当前发展的主要产品，广大科技工作者为了进一步提高它的工艺性能及自动化程度做了大量开发研究工作，并开发生产了 2 000 mm × 1 200 mm × 500 mm 及 1 000 mm × 630 mm × 1 000 mm 等超大型高速走丝电火花线切割机床，扩大了它的应用范围，满足了用户的各种需要，使其年产量稳步增长，至 2003 年已达 25 000台/年。

低速走丝电火花线切割机过去曾是“进口机”的代名词，现在已有苏州沙迪克三光机电有限公司、北京阿奇工业电子有限公司、苏州电加工机床研究所、汉川机床厂等多家制造厂商自行开发生产，2003 年年产量达 300 多台。这些机床性能好，价格不到进口机的一半，深受国内用户的欢迎。

自旋式电火花线切割机和走丝速度可调的电火花线切割机目前虽处在开发和完善阶段，产量也不大，但它们的开发思想都是企图借鉴高速走丝和低速走丝二者的优点来创造一种新型的电火花线切割方法。这些方法都希望能像高速走丝那样，在乳化液中用细钼丝在切缝加工区内作直线往返运动，保留其排屑条件好，且电极丝消耗量少的特点。同时，又能像低速走丝那样移动平稳，以获得较高的加工精度和表面粗糙度。这是一种有意义的开发工作，他们的成功不仅能为我国的电火花线切割机增加一个新品种，并以它性能价格比好以及加工消耗低的特点找到它自身的应用范围，而且为高速走丝的电火花线切割机的多次切割工艺奠定基础。

2）高速走丝系统日趋完善　高速走丝有助于工作液进入窄小的加工区，改善排屑条件，这对于切割大厚度工件以及提高切割速度都是很有意义的；同时、电极丝的往返运动可使电极丝重复使用，减少电极丝的消耗，降低切割加工的生产成本。然而，高速走丝也会造成导向器（导轮、导向块等）的磨损和系统的振动，加上电极丝的张力不易控制，它将给加工稳定性、加工精度及表面质量带来严重影响。为了解决高速走丝所存在的问题，完善高速系统，广大科技工作者已做了大量的开发研究工作，并获得了明显的效果。

上海大量电子设备有限公司已于 1999 年开发生产数字控制短程往返走丝系统，根据加工条件设定正向移动和反向移动的时间，以消除高速走丝的换向切割条纹，改善加工表面质量。两年多来应用效果明显，它虽然会影响切割速度，但高速走丝换向移动所引起的切割条纹已明显改善，使人们难于用肉眼辨别是用高速走丝线切割加工的零件还是用低速单向走丝线切割的零件。该项技术已申请了发明专利。

北京阿奇工业电子有限公司根据高速走丝正向和反向移动张力不一的缺点，开发了新型的恒张力高速走丝机构。这种新型机构不仅可以紧丝，而且可以保证正向和反向移动时电极丝的张力基本一致。因为，走丝系统上、下丝架的导轮是对称设置的，可以保证正、反移动时产生摩擦阻力相近，使电极丝的张力在整个加工过程中恒定。近年来，该公司在自己生产的线切割机上使用后效果很好，深受广大用户欢迎。

电极丝的张力直接影响电极丝的振动和频率，从而影响线切割加工效果。为了使高速走丝系统的电极丝张力恒定，华中理工大学开发了一种高速走丝线切割机钼丝恒张力伺服系统，如图 3.1-21 所示。该系统的组成是基于反馈控制来实现的，电极丝的张力由转向轮 4 上的压力传感器 5 来检测，所测得的张力变化信号经放大、滤波处理后进行比较，其偏差经控制器进行 PID 运算后，去控制 PWM 直流伺服电动机的转动，并通过电流双闭环调速系统来控制电动机 1 的运动状态，驱动丝杠 2 使浮动轮 6 的上下位置发生快速相位变化，自动调节电极丝的张力。这种控制系统的实际使用虽然存在不少问题，但他们的开发思路是积极的。

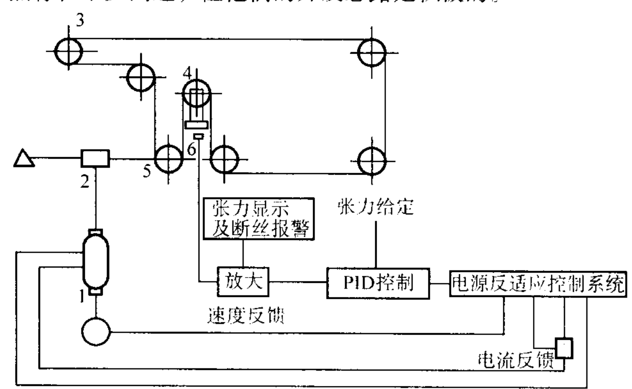


图 3.1-21　高速走丝线切割机钼丝恒张力伺服控制系统原理图

1—直流伺服电机；2—丝杠；3—相丝牵引辊；
4—转向轮；5—压力传感器；6—浮动轮

为了提高丝架的刚性，南昌江南电子仪器厂开发了结构新颖而性能优异的龙门式丝架，造价也只有音叉式丝架的一半，非常适合于大中型电火花线切割机，且锥度切割不受偏移量限制。苏州沙迪克三光机电有限公司开发生产的锥度切割装置可以稳定切割 80°的锥形零件，而苏州金马机械电子公司的 DK7740B 机床能在 200 mm 厚的工件作 30°锥度的切割，表明近几年来我国高速走丝 WEDM 机床的加工范围有了较大的发展。

3）高速走丝的多次切割试验为推广运用奠定了基础　多次切割工艺是提高电火花线切割综合工艺指标的有效途径，在低速走丝电火花线切割机上早已普遍采用，但由于高速走丝电火花线切割自身的特性及其设备条件限制，多次切割工艺目前还难于推广应用。实际上，有关高速走丝电火花线切割机的多次切割加工，早在 20 世纪 90 年代初就进行了许多有益的探索，所得到的研究结论是：在具有较高传动精度的高速走丝电火花线切割机床上，经过适当的改进（安装恒张力装置及限幅器等装置），并采用合适的加工工艺，多次切割是完全可行的。但由于高速走丝电火花线切割机并不具备上述提出的各项条件，所要求的“合适的加工工艺”难于掌握，致使多次切割工艺难于进一步试验及应用。



近几年来，许多研究单位和制造厂商根据影响线切割加工精度的各种机械要素，认识到影响重复切割精度的因素主要有：①电极丝在空间的位置稳定性和一致性；②坐标工作台的几何精度和运动定位精度；③工件本身的应力变形等，其中最关键的是电极丝在空间的位置不确定。如果用宝石挡丝块限位，又会因电极丝与宝石挡块的高速摩擦而磨损，使用寿命很短，调节也困难。北京阿奇工业电子有限公司开发的恒张力装置可以在一定的程度上抑制电极丝的振动，但仍无法避免导向导轮引起的震动。南京航空航天大学与苏州沙迪克三光机电有限公司在试验中发现，降低电极丝的移动速度能够大幅度降低导轮的振幅，有助于电极丝空间位置相对稳定。他们曾以 8 m/s 的走丝速度用依次减小电规准方法进行多次切割试验，所获得的加工表面粗糙度 R_a 为1.33 μm，加工表面有明显的切割条纹；后来用同样的加工参数，但在多次切割时降低走丝速度，依次用 8 m/s、2.7 m/s、0.8 m/s 和 0.3 m/s 进行四次切割，所获得的加工表面粗糙度 R_a 为 1.02μm，且加工表面光泽，没有明显的切割条纹。上海大量电子设备有限公司在使用短程往返走丝和高耐磨导向装置二个专利的基础上，已开发了能进行多次切割的商品化机床及软件，进行三次切割后表面粗糙度 $R_a \approx 0.8 \sim 0.9$ μm，尺寸差不超过 ±0.006 mm。

现在，我国生产的高速走丝电火花线切割机的走丝速度已有很多可以在较大范围内调节，又采用了恒张力装置，只要保证导轮及其安装质量，都可以在生产实践中采用多次加工工艺。当然，我们还需要根据不同的加工设备及其所选用的加工参数，合理确定每次切削的修光余量（即在编程时确定每次切削的补偿量）。上海大量电子设备有限公司现在已在自己的产品上面运用推广多次切割软件，获得了较好的效果。

4）数控系统得到进一步发展

① 我国的高速走丝电火花线切割机在完善单片机和单板机控制系统的基础上已开发生产了基于 PC 机的数控系统，近几年已有不少制造厂商在市场上推出了自己开发的系列化 PC 机控制的电火花线切割机，为我国的高速走丝电火花线切割机升级换代奠定了基础。

② 基于 PC 机的数控系统不仅有自动编程功能，而且都采用了 ISO 和 3B 兼容的代码格式，有助于向国际标准靠拢，提高国产机床在国际市场上的竞争力。

③ 绘图式自动编程系统已得到较广泛的应用。目前所用的绘图式自动编程系统，只要按零件图纸的标准尺寸输入，就可以自动生成电火花线切割加工程序，系统本身都具有图形编辑、几何求解及丝径补偿等功能。广东高成公司与长沙二机床的产品还可以配备激光扫描仪作为图形输入装置，对于图形复杂的零件的图形输入特别方便。

④ PC 机控制系统的内存容量大，运行速度快，为扩大数控系统功能创造了条件。目前国内几家有影响的线切割制造厂商都在自己的产品上配有数字控制脉冲电源，并建立了工艺数据库，有的还实现了一定程度的智能控制，有助于提高加工稳定性，更好地发挥机床性能。

5）现代制造技术在线切割技术开发中得到应用

① 激光作为一种现代技术，目前在电火花线切割领域除用于加工表面激光热处理和编程时的图形输入激光扫描外，有的已用于精密丝杠测量。激光测量精度高，不仅可以提高线切割机的制造精度，还可以利用激光测量所获得的精确数据与数控相结合进行丝距随机补偿。

② 电火花线切割的加工过程控制，历来都是根据传统的控制理论建立一个输入量与输出量的函数关系来进行控制的。但由于电火花线切割加工是一个复杂的系统，就其加工效果而言（如加工速度、加工精度、电极丝的丝径损耗以及加工表面质量等），就受到脉冲参数（脉冲频率、脉宽度、脉冲间隔、脉冲电流幅位）、机床的几何精度及走丝系统的稳定性、工作液的成分及注入方式，工件材料物理性能及厚度等多种因素影响，而且随机性很大，因而难以用一个精确的数学函数来反映这些输入量与输出量的关系。模糊控制理论不需要给出众多的输入量与输出量之间的严格数学关系，而是采用模糊逻辑处理使它得到简化。近几年来，航空总公司 613 所、南京航空航天大学、哈尔滨工业大学以及上海交通大学等单位都进行了研究，并获得了很好的效果。所开发的模糊控制系统一般由模糊控制器和被控制对象二部分组成，而模糊控制器又可以分为模糊输入、模糊推理决策以及模糊输出三部分。

③ 电火花线切割加工的 CAD/CAM 技术得到进一步完善。经过多年的开发研究，我们电火花线切割加工已经能利用计算机进行零件绘图、自动编程、并进行加工轨迹控制。近几年，又把 CAD 和 CAM 各模块集成在一起，形成一个从图形输入到加工过程控制的 CAD/CAM 系统。有的还在建立工艺数据库的基础上，开发了包括工艺参数优化选取的较完整的 CAD/CAM 系统。

④ 人工神经网络技术在线切割技术开发中得到了较广泛的应用。人工神经网络是以神经科学和生理科学为基础，在一定程度上抽象、简化并再现人脑在信息存储、搜索处理等方面的某些原理，用于模拟人类智能化活动，解决各种复杂问题。上海交通大学针对电火花线切割加工过程的复杂性，建立了神经网络预测模型，并在此基础上开发了高速走丝电火花线切割加工过程计算机仿真系统。华南理工大学则建立了加工间隙状态检测的神经网络模型，对其放电率及短路率的预测精度可以达到 ±1% ~ ±6%。哈尔滨工业大学也用人工神经网络技术预测与各输入条件相对应的相对火花放电率及短路率，对 WEDM 放电状态的间接检测法进行了研究，为电火花线切割加工的实时控制作了有益的探索。

⑤ 人工智能技术的开发已取得了可喜进展。人工智能技术是当前科学技术中一门前沿学科，也是一门研究如何构造智能机器或智能系统，使它能模拟、延伸、扩展人类智能的科学。我国的科技工作者为了提高国产电火花线切割机的自动化程度和工艺水平，也在进行这方面的研究，并获得了可喜的进步。目前，我们不仅开发了智能化放电状态检测及进给控制系统、脉冲参数智能优选系统、智能化图形记忆等，而且上海交通大学还对此进行了专题研究，提出电火花线切割智能控制集成系统框架，并对其关键技术进行了深入研究，获得了较满意的效果。

4.3 我国电火花线切割技术的发展趋势及主要任务

随着国民经济的高速发展和科学技术的不断进步，社会对各类产品的需求量日益增大，并对制造业提出了更高的要求。我国电火花线切割行业必然会珍惜这个大好发展机会，积极采用现代研究手段和先进技术进行深入开发研究，促使我国电火花线切割技术向信息化、智能化和绿色化方向不断发展，以满足当前市场的需要。未来的发展，将主要表现在以下几个方面。

（1）在稳步发展高速走丝机的同时，重视低速走丝电火花线切割机的开发和发展

1）高速走丝机仍然稳步发展　高速走丝电火花线切割机是我国的发明创造。由于高速走丝有利于改善排屑条件，适合于大厚度和大电流高速切割，加工性能价格比优异，深受广大用户的欢迎，因而在未来较长的一段时间内，高速走丝电火花线切割机仍是我国电加工行业的主要发展机型。高速走丝机的年产量目前已达到 25000 台，今后虽然还会有所增长，但目前的发展重点应该是提高高速走丝电火花线切割机的质量和加工稳定性，扬长避短，使其满足那些量大面宽



的普遍模具及一般精度要求的零件加工需要。根据市场发展的需要，高速走丝电火花线切割机的工艺水平必须相应提高，其最大切割速度应稳定在 100 mm^2/min 以上，而加工尺寸精度控制在 ± 0.005 ~ 0.01 mm 范围内，加工表面粗糙度 R_a 达到 1 ~ 2 μm。这就需要在机床结构、加工工艺、高频电源及控制系统等方面加以完善，并积极采用各种先进技术。

2）重视低速走丝电火花线切割机的开发和发展　低速走丝电火花线切割机由于电极丝移动平稳，易获得较高加工精度和表面粗糙度，适于精密模具和高精度零件加工。我国在引进、消化、吸收的基础上，也开发并批量生产了低速走丝电火花线切割机，满足了国内市场的部分需要。现在必须加强对低速走丝机的深入研究，开发新的规格品种，为市场提供更多的国产低速走丝电火花线切割机。与此同时，还应该在大量实验研究的基础上，建立完整的工艺数据库，完善其 CAD/CAM 软件，使自主版权的 CAD/CAM 软件商品化。

（2）完善机床设计，改进走丝机构

1）为使机床结构更加合理，必须用先进的技术手段对机床总体结构进行分析。这方面的研究将涉及运用先进的计算机有限元模拟软件对机床的结构进行力学和热稳定性分析。为了更好地参与国际市场竞争，还应该注重造型设计，在保证机床技术性能和清洁加工的前提下，使机床结构合理，操作方便，外形新颖。

2）机床上的坐标工作台大多采用十字滑板结构，为了提高它的精度，除考虑热变形及先进的导向结构外，还应采用丝距误差补偿和间隙补偿技术，以提高机床的运动精度。对于大型线切割机来说，采用十字滑板工作台结构就不够合理，而南昌江南电子仪器厂开发的 DK77100 型龙门式机床则值得研究。龙门式机床的工作台只作 Y 方向运动，X 方向运动在龙门架上完成，上下导轮座挂于横架上，可以分别控制。这不仅增加了丝架的刚性，而且工作台只作 Y 方向运动，省去了 X 方向滑板，有助于提高工作台的承重能力，降低整机总重量。

3）高速走丝电火花线切割机的走丝机构，是影响其加工质量及加工稳定性的关键部件，目前存在的问题较多，必须认真研究，加以改进。目前已开发的恒张力装置及可调速的走丝系统，应在进一步完善的基础上推广应用。

4）支持新机型的开发研究。目前所开发的自旋式电火花线切割机、高低双速走丝电火花线切割机、走丝速度连续可调的电火花线切割机，在机床结构和走丝方式上都有创新。尽管它们还不够完善，但这类的开发研究工作都有助于促进电火花线切割技术的发展，必须积极支持，并帮助完善。

（3）推广多次切割工艺，提高综合工艺水平

切割速度与加工表面质量是一种矛盾，欲想在一次切割过程既获得很高的切割速度，又要获得很好的加工质量是困难的。提高电火花线切割的综合工艺水平，采用多次切割是一种有效方法，即用较大的电规准进行第一次切割，以获得较高的切割速度，然后依次减小电规准，进行第二次、第三次切割，逐步修光，以获得满意的加工表面粗糙度和加工精度。

多次切割工艺在低速走丝电火花线切割机上早已推广应用，并获得了尚佳的工艺效果。当前的任务是通过大量的工艺试验来完善各种机型的工艺数据库，并培训广大操作人员合理掌握工艺参数（每次切割的脉冲参数、加工轨迹补偿量、电极丝移动速度等）的优化选取，以提高其综合工艺效果。在此基础上，可以开发多次切割的工艺软件，帮助操作人员合理掌握多次切割工艺。

高速走丝电火花线切割机因走丝系统不稳定，不仅容易发生振动，而且电极丝的空间不易准确控制，难于再现重复的加工轨迹，致使多次切割工艺至今无法在生产实践中推广应用。我国科技工作者已进行过大量的实验研究，所得到的研究结论是：高速走丝电火花线切割机采用多次切割工艺不仅是必要的，而且是可行的。为了在高速走丝电火花线切割机上推广应用多次切割工艺，应该努力创造以下条件：①按国家的有关标准确保机床的制造精度和走丝系统的稳定性，有条件的还应采用导向装置及恒张力机构等附加措施完善走丝系统；②开发生产可调速的走丝机构；③深入研究多次切割工艺，提供有关机床的工艺数据表或工艺数据库；④解决多次切割的工艺参数优化选取方法，包括脉冲参数、加工轨迹的补偿以及电极丝移动速度等，并对有关操作人员进行必要的技术培训。

（4）发展 PC 机控制系统，扩充线切割机的控制功能

目前国内已有的基于 PC 机电火花线切割机数控系统主要用于加工轨迹的编程和控制，PC 机的资源并没有得到充分开发利用，今后可以在以下几个方面进行深入开发研究。

1）开发和完善开放式的数控系统。目前高速走丝电火花线切割机所用的数控软件是在 DOS 基础上开发的，有很大的局限性，难于进一步扩充其功能。现在应加速向以 PC 机为基础的开放式、多任务管理与控制系统发展，以便充分开发 PC 机的资源，扩充数控系统功能。

2）继续完善数控电火花线切割加工的计算机绘图、自动编程、加工规机控制及其缩放等功能，扩充自动定位、自动找中心、低速走丝及自动穿丝、高速走丝及自动紧缩等功能，提高电火花线切割加工的自动化程度。

3）研究放电间隙状态数值检测技术，建立伺服控制模型，开发加工过程伺服进给自适应控制系统。为了提高加工精度，还应对传动系统的丝距误差及传动间隙进行精确检测，并利用 PC 机进行自动补偿。

4）开发和完善数值脉冲电源，并在工艺试验基础上建立工艺数据库，开发加工参数优化选取系统，以帮助操作者根据不同的加工条件和要求合理选用加工参数，充分发挥机床潜力。

5）深入研究电火花线切割加工工艺规律，建立加工参数的控制模型，开发加工参数自适应控制系统，提高加工稳定性。

6）开发有自主版权的电火花线切割 CAD/CAM 和人工智能软件。在上述各模块开发利用的基础上，利用 PC 机及其开放式数控系统所创造的条件，建立电火花线切割 CAD/CAM 集成系统和人工智能系统，并使其商品化，以全面提高我国电火花线切割加工的自动化程度及工艺水平。

（5）积极采用现代技术，促进电火花线切割技术发展

今后的电火花线切割技术开发研究将会涉及到：用激光测量技术来分析研究机床零部件的制造质量；用有限元技术来分析机床结构的力学性能和热稳定性；用陶瓷等新材料来制造机床的关键零部件及其工夹具；用模糊控制技术来开发伺服进给和加工参数控制系统；用人工神经网络技术来研究各种复杂系统的输入量与输出量之间的关系，并建立相关的神经网络模型；用数值模拟（计算机仿真）技术来研究加工过程的各种疑难问题及其规律，并预测其结果；用专家系统或人工智能系统来控制加工过程等。

编写：李明辉（上海交通大学）

第2章　数控电火花线切割设备

1　概述

1.1　基本组成

1）高速走丝线切割机床　高速走丝电火花线切割机床，一般由机床主机，脉冲电源和控制系统三大部分组成，见图3.2-1。

高速走丝电火花线切割机床主机部件如图3.2-2所示。

两种高速走丝线切割机床的外观见图3.2-3。

2）低速走丝　数控低速走丝线切割机的各组成部分见图3.2-4。

低速走丝线切割的加工原理见图3.2-5，图中标出了各主要组成部分。

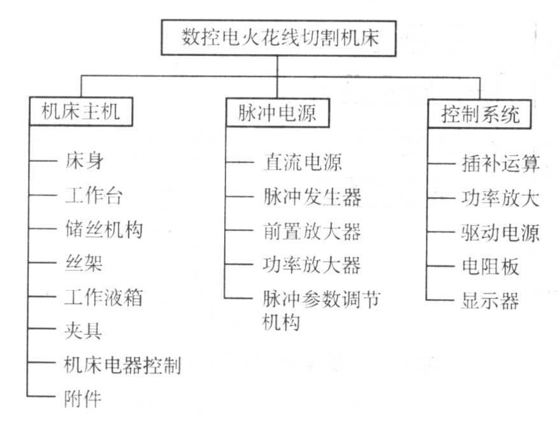


图3.2-1　高速走丝电火花线切割机床的组成

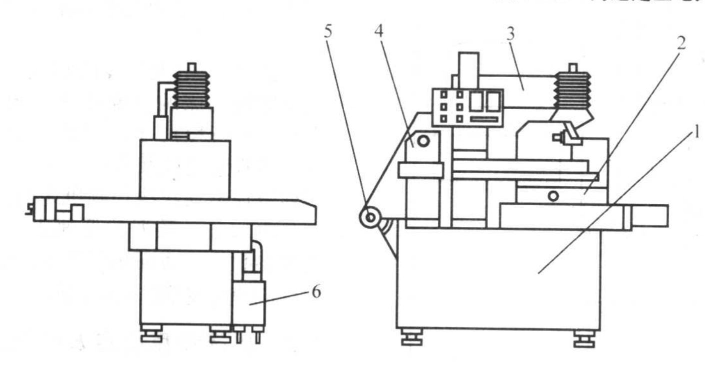


图3.2-2　高速走丝电火花线切割机床主机部件

1—床身；2—工作台；3—丝架；4—储线筒；5—紧丝电动机；6—工作液循环系统

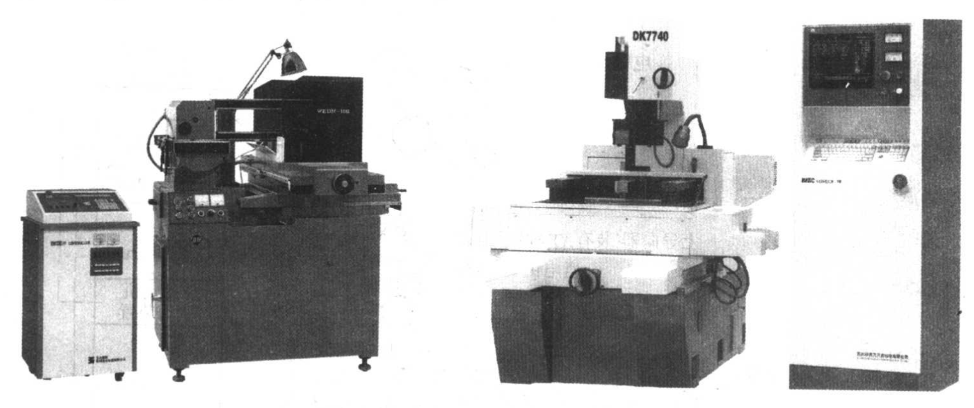


图3.2-3　高速走丝线切割机床的外观

一种低速走丝线切割机的外观见图3.2-6。

低速走丝线切割机床的结构，如图3.2-7所示。

1.2　型号规格及参数标准

1）型号规格　我国电火花线切割机床型号的编制是根据JB/T 7445.2—1998《特种加工机床型号编制方法》的规定进行的，机床型号由汉语拼音字母和阿拉伯数字组成，它表示机床的类别、特性和基本参数。

数控电火花线切割机（高速走丝）型号DK7725的含义如下：

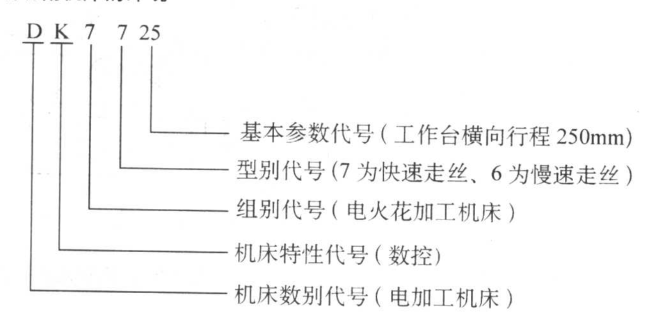




图 3.2-4 低速走丝线切割机的组成

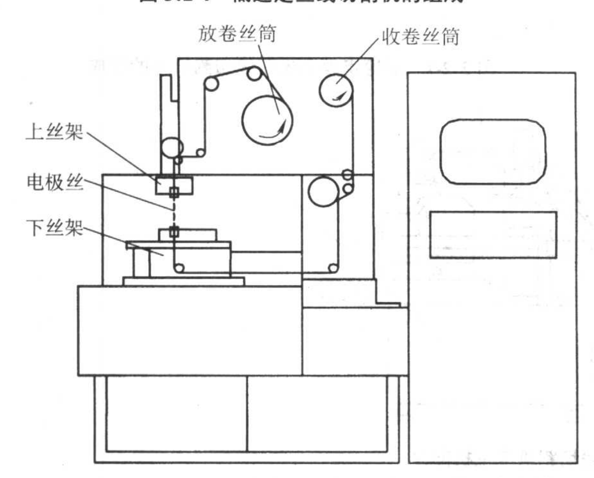


图 3.2-5 低速走丝线切割加工原理



图 3.2-6 低速走丝线切割机外观图

与上述同样规格的低速走丝数控电火花线切割机的型号则为 DK7625。

我国已颁布了电火花线切割机床系列，现将 GB/T 7925—1987《电火花线切割机参数》中参数表摘录于表 3.2-1。

2）数控电火花线切割机床的主要技术参数 数控电火花线切割机床的主要技术参数包括：工作台行程（纵向行程×横向行程）、最大切割厚度、加工表面粗糙度、加工精度、切割速度以及数控系统的控制功能等。表 3.2-2 为 DK77 系列数控电火花线切割机床的主要型号及技术参数。

DK76××系列的低速走丝电火花线切割机床，其通常技术参数为：表面粗糙度 $R_a \leqslant 0.8\ \mu m$、加工精度 $\leqslant 5\ \mu m$、最大切割速度 $> 200\ mm^2/min$。

1.3 机床精度标准及检验方法

机床精度是直接影响被加工工件精度的决定因素，因而制造或修理时都要对机床的精度进行检验。为了保证产品质量，各国都制定了有关线切割机床的精度标准。

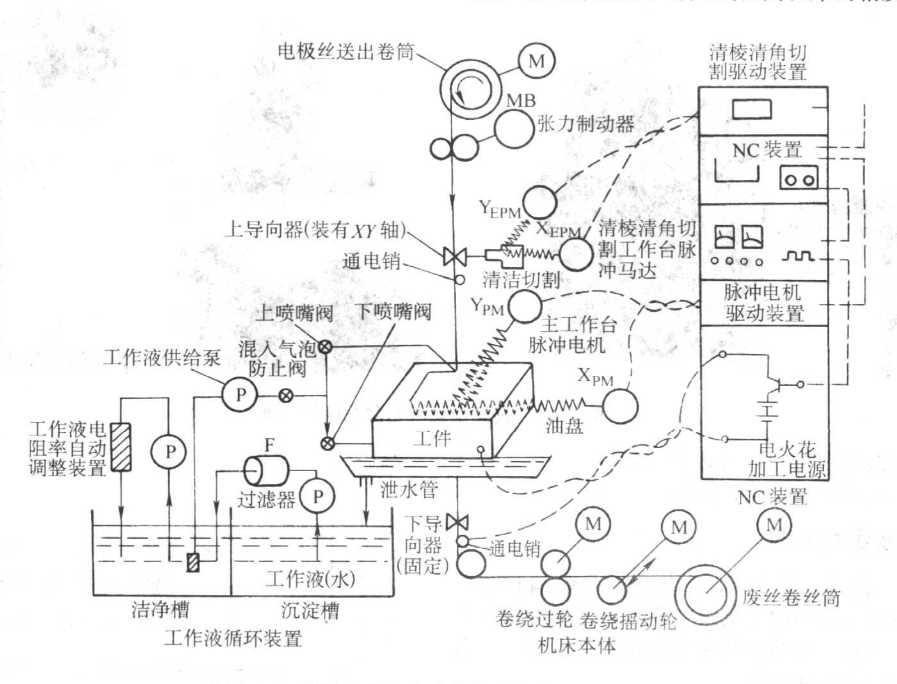


图 3.2-7 低速走丝电火花线切割机床的组成示意图



表 3.2-1　机床参数表

工作台	横向行程/mm	100		125		160		200		250		320		400		500		630		800	
	纵向行程/mm	125	160	160	200	200	250	250	320	320	400	400	500	500	630	630	800	800	1 000	1 000	1 200
	最大承载重量/kg	10	15	20	258	40	50	60	80	120	160	200	250	320	500	500	630	960	1 200	1 500	
工件尺寸	最大宽度/mm	125		160		200		250		320		400		500		630		800		1 000	
	最大长度/mm	200	250	250	320	320	400	400	500	500	630	630	800	800	1 000	1 000	1 250	1 250	1 600	1 600	2 000
	最大切割厚度/mm	40、60、50、100、120、180、200、250、300、350、400、450、500、550、600																			
最大切割锥度		0°、3°、6°、9°、12°、15°、18°（18°以上，每挡间隔增加 6°）																			

表 3.2-2　DK77 系列电火花线切割机床的主要型号及技术参数

机床型号	DK7716	DK7720	DK7725	DK7732	DK7740	DK7750	DK7763	DK7780	DK77120
工作台行程/mm	200 × 160	250 × 200	320 × 250	500 × 320	500 × 400	800 × 500	800 × 630	1 000 × 800	2 000 × 1 200
最大切割厚度/mm	100	120	200	300（可调）	400（可调）	400（可调）	400（可调）	500（可调）	500 可调
加工表面粗糙度 R_a/μm	2.5								
加工精度/mm	0.015		0.02			0.03			
切割速度/mm²·min⁻¹	70	80	80	100	120	120	120	120	120
加工锥度	3°～60°各厂家的型号不同								
控制方式	各种型号均有单板（或单片）机或微机控制								

注：各厂家生产的机床的切割速度有所不同。

(1) 机床精度标准

中华人民共和国国家标准 GB/T 7926—1987《电火花线切割机精度》，是高速走丝数控电火花线切割机床精度检验的依据。机械行业标准 JB/T 5543—1991《数控低速走丝电火花线切割机精度》是低速走丝数控电火花线切割机床精度检验的依据。机床在检验前应调对水平，水平仪读数不得超过 0.04/1 000。测量工作台某一坐标时，工作台其他运动部分原则上应处于其行程的中间位置。当允差值根据所测量的长度折算时，其折算结果小于 0.001mm 的尾数仍按 0.001 mm 计。

(2) 检验工具

为了检验方便，检验时需根据检验的内容和精度要求，采用不同的量具。常用的量具有水平仪、量块、千分表、标尺、角尺。

(3) 高速走丝线切割机床的精度检验

1) 几何精度检验

① 工作台台面的平面度（见图 3.2-8）。工作台位于行程的中间位置，用标尺、水平仪、平尺与可调量块测定平面度，用最小条件法或三点法处理数据，并求出平面度数据。按工作台台面的长边值确定允差。允差为 0.04/1 000。

② 工作台移动在垂直面内的直线度（见图 3.2-9）。在线架上置一精密平尺，指示器固定在工作台台面的中间位置，使其触头触及平尺检验面。

调整平尺，使指示器在平尺两端读数相等，然后移动工作台，在全行程上检验，指示器读数最大差值为误差值。

应对纵、横坐标分别进行检验。

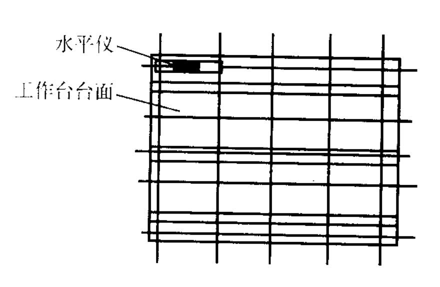


图 3.2-8　工作台台面平面度检验

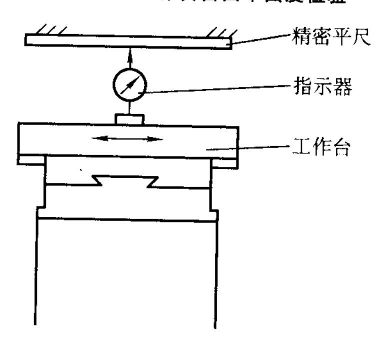


图 3.2-9　工作台移动在垂直面内的直线度

在 100 mm 测量长度上允差 0.006 mm，每增加 200 mm，允差值增加 0.003 mm。

当测量长度小于 100 mm 时，允差均为 0.006 mm，但超过 100 mm 时，按每增加 200 mm 允差值增加 0.003 mm 折算。例如，行程为 160 mm 时，允差值应为 0.006 + 60/200 × 0.003 = 0.0069 mm，按前面规定的折算方法定为 0.007 mm。



③ 工作台移动在水平面内的直线度（见图3.2-10）。在线架上置一精密平尺，指示器固定在工作台台面的中间位置，使其测头触及平尺检验面。调整平尺，使指示器在平尺两端读数相等，然后移动工作台，在全行程上检验，指示器读数最大差值为误差值。

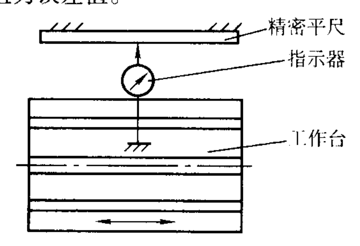


图3.2-10　工作台移动在水平面内的直线度

纵、横坐标应分别检验。

在100 mm测量长度上允差为0.003 mm，每增加200 mm，允差值增加0.003 mm。

④ 工作台移动对工作台面的平行度（见图3.2-11）。在工作台上放两个等高块，平尺放在等高块上。指示器固定在线架上，指示器测头触及平尺上，在全行程上检验。指示器读数最大差值为误差值。

纵、横坐标应分别检验。

在100 mm测量长度上允差为0.012 mm，每增加200 mm，允差值增加0.006 mm。

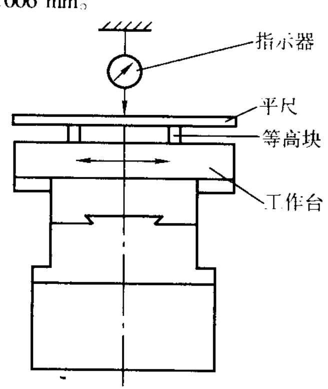


图3.2-11　工作台移动对工作台面的平行度

⑤ 工作台横向移动对工作台纵向的垂直度（见图3.2-12）。将角尺置于线架上，指示器固定在工作台台面上。调整角尺，使角尺的一侧面与工作台纵向移动方向平行，然后将工作台位于纵向行程的中间位置。

将指示器测头顶在角尺的另一侧面。移动横向工作台在全行程上检验，测量长度不大于200 mm，指示器的最大差值为误差值。允差为在200 mm长度上≤0.012 mm。

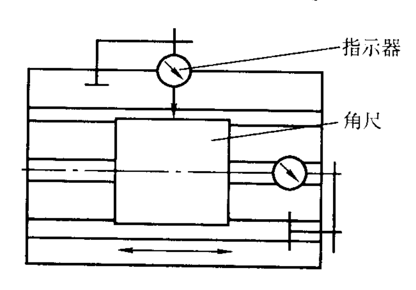


图3.2-12　工作台横向移动对工作台纵向的垂直度

⑥ 储丝筒的圆跳动（见图3.2-13）。将指示器测头顶在储丝筒表面上，转动储丝筒，分别在中间和离两端10 mm左右处检验，指示器读数的最大差值为误差值。

储丝筒直径小于或等于120 mm时，允差值为0.012 mm，大于120 mm时，允差值为0.02 mm。

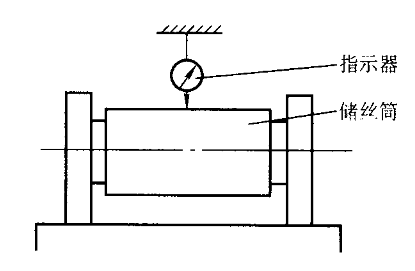


图3.2-13　储丝筒的圆跳动

2）机床数控精度检验

① 工作台运动的失动量（见图3.2-14）　在工作台上放一基准块，指示器固定在线架上，使得测头顶在基准块测量面上，先向正（或负）方向移动，以停止位置作为基准位置，然后给予不小于0.1 mm的程序，继续向同一方向移动，从这个位置开始，再给予相同的程序向负（或正）的方向移动，测量此时的停止位置和基准位置之差。在行程的中间和靠近两端的三个位置，分别进行七次本项测量，求各位置的平均值，以所得各平均值中的最大值为误差值。它主要反映了正反向时传动丝杆与螺母之间的间隙带来的误差。

纵、横坐标分别检验，允差值为0.005 mm。

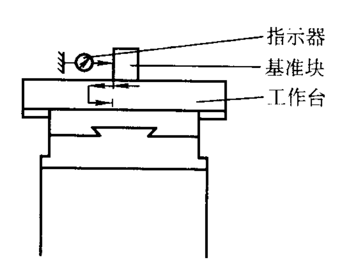


图3.2-14　工作台运动的失动量

② 工作台运动的重复定位精度（见图3.2-15）　在工作台上选一点，向同一方向上移动不小于0.1 mm的距离进行七次重复定位，测量停止位置。记录差值的最大值。

在工作台行程的中间和靠近两端三个位置进行检验，以所得的三个差值中的最大值为误差值。它主要反映工作台运动时，动、静摩擦力和阻力大小是否一致，装配预紧力是否合适，而与丝杆间隙和螺距误差等关系不大。

纵、横坐标分别检验，允差值为0.002 mm。

③ 工作台运动的定位精度（见图3.2-16）　工作台向正（或负）方向移动，以停止位置作为基准。然后按表3.2-3所列的测量间隔 L 给程序向同一方向移动，顺序进行定位。根据基准位置测定实际移动距离和规定移动距离的偏差。测定值中的最大偏差与最小偏差之差为误差值。它主要反映了螺距误差，也与重复定位精度有一定关系。

纵、横坐标分别检验。

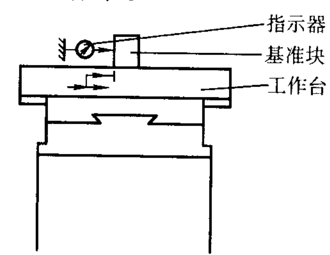


图3.2-15　工作台运动的重复定位精度



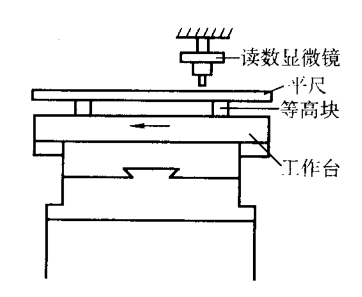


图 3.2-16　工作台运动的定位精度

表 3.2-3　测量间隔 L　mm

工作台行程	测量间隔	测量长度
≤125	10	全行程
>125～320	20	
>320	50	

在 100 mm 测量长度上允差为 0.01 mm，每增加 200 mm，允差值增加 0.005 mm，最大允许值为 0.03 mm。

④ 每一脉冲指令的进给精度（见图 3.2-17）　工作台向正（或负）方向移动，以停止位置作为基准，每次给一个最小脉冲指令且向同一方向移动，移动 20 个脉冲指令的距离，测量各个指令的停止位置，算出

$$误差 = |l - m|_{max}$$

式中，l 为相邻停止位置的距离；m 为最小脉冲当量。

求得 20 个相邻停止位置间的距离和最小脉冲当量之差，取最大值。

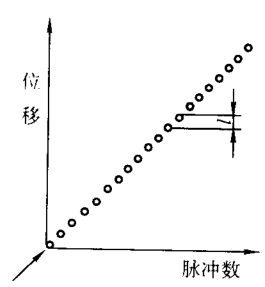


图 3.2-17　每一脉冲指令的进给精度

分别在工作台行程的中间及两端附近处测量，取其中的最大值为误差值。它主要反映数控单脉冲进给的灵敏度和一致性。当导轨和丝杆螺母调得太紧，摩擦力太大，进给时就易蹩劲“丢步”，蹩劲过多后就会造成“一步走两步”。

纵、横坐标应分别检验。

行程小于或等于 400 mm 时，允差值小于一个脉冲当量，行程大于 400 mm 时，允差值小于两个脉冲当量。这里要注意“小于”二字的含义。简单地说，允差值小于一个脉冲当量的意思就是相邻停止位置的距离应大于零或小于两个脉冲当量，即不允许有一步不动或一步走整整两个脉冲当量。

3）工作精度检验

① 纵剖面上的尺寸差（见图 3.2-18）　切割出如图 3.2-18 的八面柱体试件，测量两个平行加工表面的尺寸，在中间和各离两端 5 mm 的三处进行测量，求出最大尺寸与最小尺寸之差值。依次对各平行加工表面进行上述检验，其最大差值为误差值，允差值为 0.012 mm。

② 横剖面上的尺寸差　取上述试件在同一横剖面上依次测量加工表面的对边尺寸，取最大差值。在试件的中间及各离两端 5 mm 处分别进行上述检验，其最大值为误差值。允差值为 0.015 mm。

③ 表面粗糙度（见图 3.2-19）　在加工表面的中间及

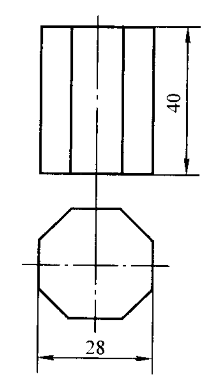


图 3.2-18　正八棱柱体试件，测纵、横剖面上的尺寸差

接近两端 5 mm 处测量，取 R_a 的平均值。取试件的各个加工面分别测量，误差以 R_a 最大平均值计。

在切割试件时，切割速度应大于 20 mm²/min，切割走向为 45°斜线。本试件可用上面的八棱柱代替。

允差值 $R_a \leqslant 2.5\ \mu m$。

④ 加工孔的坐标精度　将图 3.2-19 正方柱体表面粗糙度试件如图 3.2-20 所示试件安装在工作台上，并使其基准面与工作台运动方向平行，然后以 A、B、C、D 为中心，切割四个正方形孔。对试件的具体要求如下：

a）试件切割厚度需大于或等于 5 mm；

b）最小正方形孔边长需大于或等于 10 mm；

c）每次孔的扩大余量需大于或等于 1 mm（允许含有 $R = 3$ mm左右圆角）；

d）正方孔也可用相应的圆孔代替。

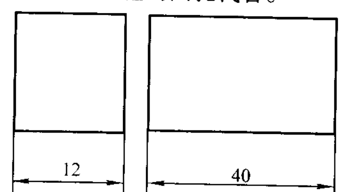


图 3.2-19　正方柱体表面粗糙度试件

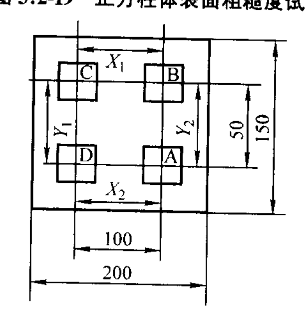


图 3.2-20　测加工孔坐标精度的试件

测量各孔沿坐标轴方向的中心距 X_1、X_2、Y_1 和 Y_2，并分别与设定值相比，以差值中的最大值为误差值。

允差值为 0.015 mm。

⑤ 加工孔的一致性　取上项试件测量四孔在 X～Y 方向上的尺寸，即 X_1～X_4 和 Y_1～Y_4，其最大尺寸差为误差值（X 与 X 相减，Y 与 Y 相减）。

允差值为 0.03 mm。

线切割机床精度检验应在正常状态下进行。应事先调好机床水平，做好机床维护清洁工作，环境条件（温度、湿度）、电源电压及频率等均应符合规定。使用的量具及仪器均需在检定有效期内。检验结果应稳定可靠，检验者应熟悉量具的使用及标准的含义。

（4）低速走丝线切割机床的精度检验



1）几何精度检验

① 工作台台面的平面度（见图 3.2-21）　工作台位于行程的中间位置并锁紧，用标尺、水平仪、平尺与可调量块测定平面度，用最小条件法或三点法处理数据，并求出平面度数据。按工作台台面的长边值确定允差。允差为在 1000 mm 测量长度上 0.04 mm。

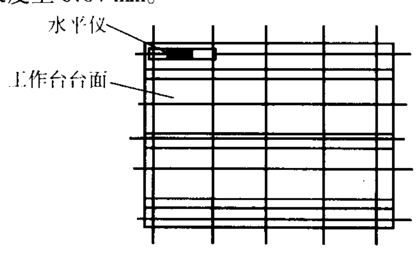


图 3.2-21　工作台台面平面度检验

② 工作台移动在垂直面内的直线度（见图 3.2-22）　在工作台上置一平尺，指示器固定在线架上，使其测头触头触及平尺检验面。

调整平尺，使指示器在平尺两端读数相等，然后移动工作台，在全行程上检验，指示器读数最大差值为误差值。

纵、横坐标应分别检验。

在 100 mm 测量长度上允差 0.006 mm，每增加 200 mm，允差值增加 0.005 mm。

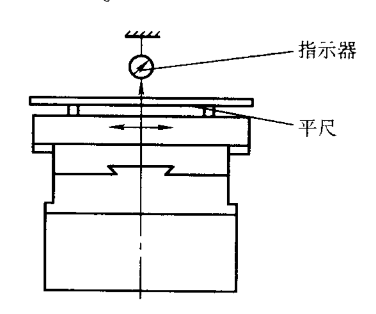


图 3.2-22　工作台移动在垂直面内的直线度

③ 工作台移动在水平面内的直线度（见图 3.2-23）　在工作台上置一平尺，使其指示器测头触及平尺检验面。调整平尺，使指示器在平尺两端读数相等，然后移动工作台，在全行程上检验，指示器读数最大差值为误差值。

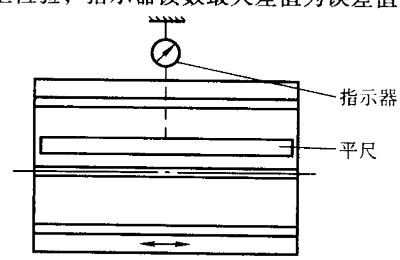


图 3.2-23　工作台移动在水平面内的直线度

纵、横坐标应分别检验。

在 100 mm 测量长度上允差为 0.005 mm，每增加200 mm，允差值增加 0.005 mm。

④ 工作台移动对工作台面的平行度（见图 3.2-24）　在工作台上置一平尺，使其指示器测头触及平尺，在全行程上检验。指示器读数最大差值为误差值。

纵、横坐标应分别检验。

在 100 mm 测量长度上允差为 0.012 mm，每增加200 mm，允差值增加 0.006 mm。

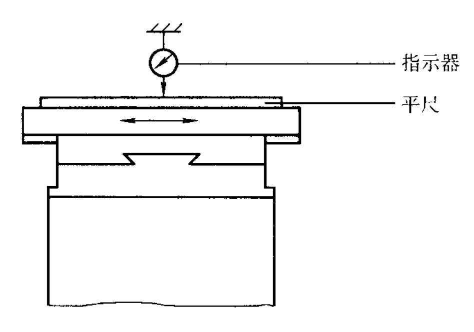


图 3.2-24　工作台移动对工作台面的平行度

⑤ 工作台横向移动对工作台纵向的垂直度（见图 3.2-25）　将角尺置于工作台上，调整角尺，使角尺的一侧面与工作台纵向移动方向平行，然后将工作台位于纵向行程的中间位置，并锁紧。将指示器测头顶在角尺的另一侧面。移动横向工作台在全行程上测量，指示器的最大差值为误差值。

允差为在 200 mm 长度上 < 0.01 mm。

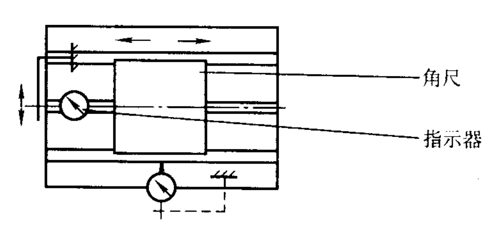


图 3.2-25　工作台横向移动对工作台纵向的垂直度

⑥ 线架垂直移动对工作台面的垂直度（见图 3.2-26）　在工作台正中位置放置一圆柱角尺，将指示器固定在线架上，使其测头触及圆柱角尺。

在全行程上（按 25 mm 等距离）移动线架并锁紧，指示器读数的最大差值为误差值。

将指示器固定位置旋转 90°再重复上述检验，以所得的两个值中的较大值作为误差值。允差为在 100 mm 长度上 < 0.010 mm。

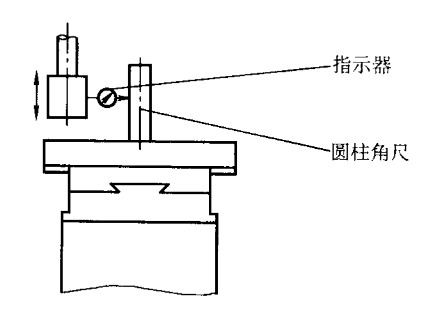


图 3.2-26　线架垂直移动对工作台面的垂直度

⑦ 线架移动对工作台垂直面内的平行度（见图 3.2-27）　在工作台上放置一平尺，指示器固定在线架上，使其测头触及平尺检验面。

移动工作台，调整平尺，使指示器在平尺两端读数相等。然后移动线架，在全行程上检验，指示器读数的最大差值为误差值。

线架纵、横行程应分别检验。允差为 0.012 mm。

⑧ 线架移动对工作台水平面内的平行度（见图 3.2-28）　在工作台上放置一平尺，指示器固定在线架上，使其测头触及平尺检验面。移动工作台，调整平尺，使指示器在平尺两端读数相等。然后移动线架，在全行程上检验，指示器读数的最大差值为误差值。



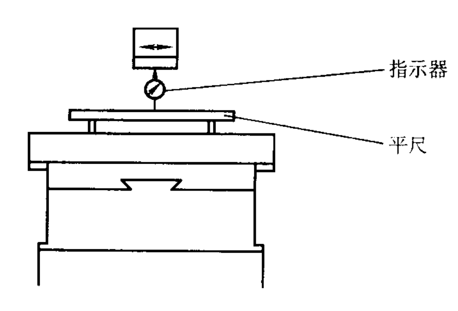


图 3.2-27　线架移动对工作台垂直面内的平行度

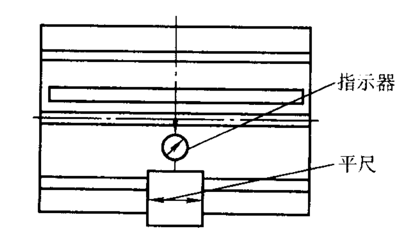


图 3.2-28　线架移动对工作台水平面内的平行度

线架纵、横行程应分别检验。允差为 0.010 mm。

⑨ 线架横向移动对线架纵向的垂直度（见图 3.2-29）　角尺置于工作台上，指示器固定在线架上。调整角尺，使得角尺的一侧面与线架纵向移动方向平行，然后使线架位于纵向行程的中间位置。将指示器测头触及角尺的另一侧面上，线架横向移动，在全行程上检验，指示器读数的最大差值为误差值。

允差为 0.010 mm。

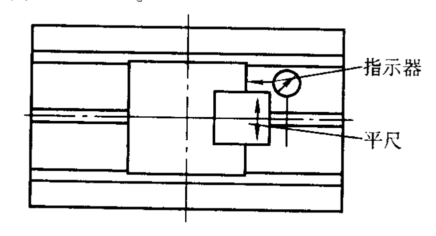


图 3.2-29　线架横向移动对线架纵向的垂直度

2）机床数控精度检验

① 工作台运动的失动量（见图 3.2-30）　在工作台上放一基准块，指示器固定在线架上，使得测头顶在基准块测量面上，先向正（或负）方向移动，以停止位置作为基准位置，然后给予不小于 0.1mm 的程序，继续向同一方向移动，从这个位置开始，再给予相同的程序向负（或正）方向移动，测量此时的停止位置和基准位置之差。在行程的中间和靠近两端的三个位置，分别进行七次本项测量，求各位置的平均值，以所得各平均值中的最大值为误差值。它主要反映了正反向时传动丝杆与螺母之间的间隙带来的误差。

纵、横坐标应分别检验，允差值为 0.004 mm。

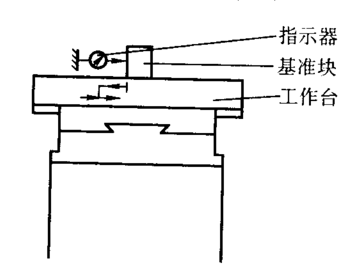


图 3.2-30　工作台运动的失动量

② 工作台运动的重复定位精度（见图 3.2-31）　在工作台上选一点，向同一方向上移动不小于 0.1 mm 的距离进行七次重复定位，测量停止位置。记录差值的最大值。

在工作台行程的中间和靠近两端三个位置进行检验，以所得的三个差值中的最大值为误差值。它主要反映工作台运动时，动、静摩擦力和阻力大小是否一致，装配预紧力是否合适，而与丝杆间隙和螺距误差等关系不大。

纵、横坐标应分别检验，允差值为 0.002 mm。

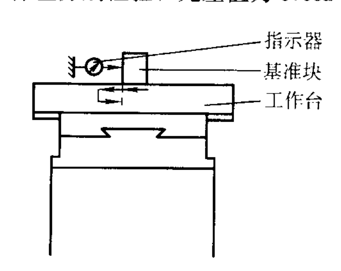


图 3.2-31　工作台运动的重复定位精度

③ 工作台运动的定位精度（见图 3.2-32）　工作台向正（或负）方向移动，以停止位置作为基准。然后按表 3.2-4 所列的测量间隔 L 给程序向同一方向移动，顺序进行定位。根据基准位置测定实际移动距离和规定移动距离的偏差。测定值中的最大偏差与最小偏差之差为误差值。它主要反映了螺距误差，也与重复定位精度有一定关系。

纵、横坐标应分别检验。

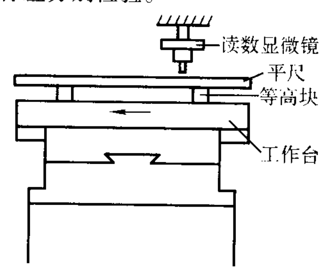


图 3.2-32　工作台运动的定位精度

表 3.2-4　测量间隔 L　mm

工作台行程	测量间隔	测量长度
≤125	10	全行程
>125～320	20	
>320	50	

在 100 mm 测量长度上允差为 0.012 mm，每增加200 mm，允差值增加 0.005 mm，最大允许值为 0.03 mm。

④ 每一脉冲指令的进给精度（见图 3.2-33）　工作台向正（或负）方向移动，以停止位置作为基准，每次给一个最小脉冲指令且向同一方向移动，移动 20 个脉冲指令的距离，测量各个指令的停止位置，可以算出：

$$误差 = |l - m|_{max}$$

式中，l 为相邻停止位置的距离；m 为最小脉冲当量。

求得 20 个相邻停止位置间的距离和最小脉冲当量之差，取最大值。

分别在工作台行程的中间及两端附近处测量，取其中的最大值为误差值。它主要反映数控单步单脉冲进给的灵敏度和一致性。

纵、横坐标分别检验。允差值小于一个脉冲当量。

3）工作精度检验

① 纵剖面上的尺寸差（见图 3.2-34）　切割出如图 3.2-34 的八面柱体试件，测量两个平行加工表面的尺寸，在中间和两端 5 mm 三处进行测量（对切割起点的加工面需避开

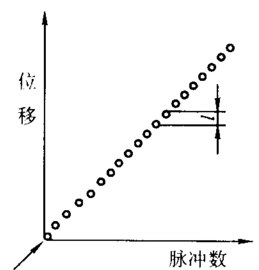


图 3.2-33 每一脉冲指令的进给精度

切割起点，在其左右两侧测量二个值)，求出最大尺寸与最小尺寸的差值。

依次对各平行加工表面进行上述检验，其最大差值为误差值，允差值为 0.012 mm。

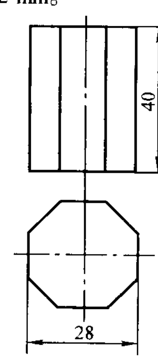


图 3.2-34 正八棱柱体试件，测纵、横剖面上的尺寸差

② 横剖面上的尺寸差 取上述试件在同一横剖面上依次测量加工表面的对边尺寸（对切割起点的加工面须避开切割起点，在其左右两侧测量二个值)，取最大差值。在试件的中间及距两端 5 mm 处分别进行上述检验，其最大值为误差值。

允差值为 0.015 mm。

③ 表面粗糙度（见图 3.2-35） 在加工表面的中间及接近两端 5 mm 处测量，取 R_a 的平均值。取试件的各个加工面分别测量，误差以 R_a 最大平均值计。

在切割试件时，切割速度应大于 25 mm^2/min，切割走向为 45°斜线。本试件可用上面的八棱柱代替。

允差值 $R_a \leqslant 2.5$ μm。

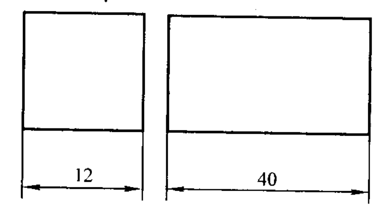


图 3.2-35 正方柱体表面粗糙度试件

④ 锥度大端尺寸差（见图 3.2-36） 分别测量试件大端的对边尺寸，取对边尺寸的最大差值为误差值。

试件大端对边尺寸需大于 31 mm。

允差值为 0.015 mm。

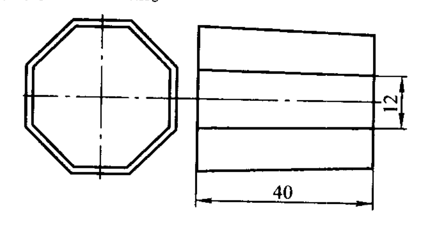


图 3.2-36 锥度大端尺寸差试件

⑤ 最低表面粗糙度（见图 3.2-37） 在加工表面的中间及接近两端 5 mm 处测量，取 R_a 的平均值。取试件的各个加工面分别测量，误差以 R_a 最大平均值计。

允差值 $R_a \leqslant 1.25$ μm。

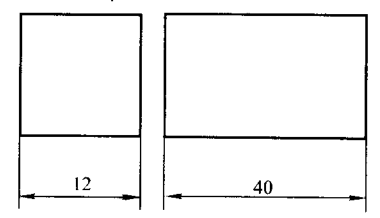


图 3.2-37 正方柱体最低表面粗糙度试件

⑥ 加工孔的坐标精度 将图 3.2-38 所示试件安装在工作台上，并使其基准面与工作台运动方向平行，然后以 A、B、C、D 为中心，切割四个正方形孔。对试件的具体要求如下：试件切割厚度需大于或等于 5 mm；最小正方形孔边长需大于或等于 10 mm；每次孔的扩大余量须大于或等于 1 mm（允许有 $R=3$mm 左右圆角）。

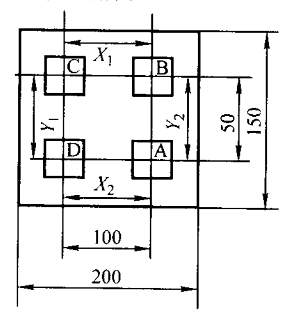


图 3.2-38 测加工孔坐标精度的试件

测量各孔沿坐标轴方向的中心距 X_1、X_2、Y_1 和 Y_2，并分别与设定值相比，以差值中的最大值为误差值。

允差值为 0.012 mm。

⑦ 加工孔的一致性 取上项试件测量四孔在 X、Y 方向上的尺寸，即 $X_1 \sim X_4$ 和 $Y_1 \sim Y_4$，其最大尺寸差为误差值（X 与 X 相减，Y 与 Y 相减)。

允差值为 0.02 mm。

线切割机床精度检验应在正常状态下进行。应事先调好机床水平，做好机床维护清洁工作，环境条件（温度、湿度)、电源电压及频率等均应符合规定。使用的量具及仪器均需在检定有效期内。检验结果应稳定可靠，检验者应熟悉量具的使用及标准的含义。

另外，值得注意的是无论高速走丝电火花线切割机，还是低速走丝电火花线切割机，其精度标准都在修订中，都将靠向 ISO 标准。读者可参阅 ISO 14137：2000《机床电火花线切割机（Wire EDM）检验条件术语和精度检验》。

1.4 使用规则及维护保养

（1）电火花线切割机床的使用规则

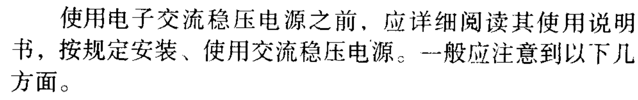
线切割机床是技术密集型产品，属于精密加工设备，操作人员在使用机床前必须经过严格的培训，取得合格的操作证明后才能上机工作。

为了安全、合理和有效地使用机床，要求操作人员必须遵守以下几项规则：

1）对自用机床的性能、结构有较充分的了解，能掌握操作规程和遵守安全生产制度；

2）在机床的允许规格范围内进行加工。不要超重或超行程工作；

3）经常检查机床的电源线、超程开关和换向开关是否



安全可靠，不允许带故障工作；

4）按机床操作说明书所规定的润滑部位，定时注入规定的滑润油或润滑脂，机构运转灵活，特别是导轮和轴承，要定期检查和更换；

5）加工前检查工作液箱中的工作液是否足够，水管和喷嘴是否通畅；

6）下班后清理工作区域，擦净夹具和附件等；

7）定期检查机床电气设备是否受潮和可靠，并清除尘埃，防止金属物落入；

8）遵守定人定机制度，定期维护保养。

（2）电火花线切割机床的保养方法

线切割机床维护保养的目的是为了保持机床能正常可靠地工作，延长其使用寿命。一般的维护保养方法如下。

1）定期润滑　线切割机床上需定期润滑的部位主要有机床导轨、丝杠螺母、传动齿轮、导轮轴承等，一般用油枪注入。轴承和滚珠丝杠如有保护套式的，可以经半年或一年后拆开注油。

2）定期调整　对于丝杠螺母、导轨及电极丝挡块和进电块等，要根据使用时间、间隙大小或沟槽深浅进行调整。部分线切割机床采用锥形开槽式的调节螺母，则需适当地拧紧一些，凭经验和手感确定间隙，保持转动灵活。滚动导轨的调整方法为松开工作台一边的导轨固定螺钉，拧调节螺钉，看百分表的反应，使其紧靠另一边。挡丝块和进电块如使用了很长时间，摩擦出沟痕，须转动或移动一下，以改变接触位置。

3）定期更换　线切割机床上的导轮、馈电电刷（有的为进电块）、挡丝块及导轮轴承等均为易损件，磨损后应更换。导轮的装拆技术要求较高，可参考 2.2 节进行。电刷更换较易，螺母拧出后，换上同型号的新电刷即可。挡丝块目前常用硬质合金，只需改变位置，避开已磨损的部位即可。另外，高速走丝机的工作液，低速走丝机的过滤器和离子交换树脂等都是易耗品，应根据使用说明书及时更换。

（3）交流稳压电源的使用方法

由于交流供电电压的变化，会使加工和控制系统的输出电压幅值不稳定，从而导致加工效果不良。严重时，会使机床电器控制失灵，造成机床运行故障，致使工件报废。配置交流稳压电源，可在一定程度上缓解这类问题。

按相数分，交流稳压电源有单相和三相稳压电源；按稳压原理分，有磁饱和式稳压电源和电子交流稳压电源。目前使用的多数是电子交流稳压电源，有各种规格的成品可供选购。

使用电子交流稳压电源之前，应详细阅读其使用说明书，按规定安装、使用交流稳压电源。一般应注意到以下几方面。

1）交流稳压电源的输入、输出线除了考虑机械强度、防伤、绝缘之外，还要考虑导线径有一定裕度。

2）为确保稳压电源正常工作，其负载应小于稳压电源的额定输出功率。不可让交流稳压电源超过规定的连续运行时间。

3）保证稳压电源的保护接地可靠，符合接地标准。

4）尽量满足稳压电源对使用环境的要求，例如温度、湿度、海拔高度、腐蚀性气体及液体、导电尘埃等。

5）稳压电源中的保护设施，例如保险丝、过压和欠压保护及过流保护回路的调节元件（如电位器等），不可任意变动与调节。

6）使用中要注意监视稳压电源的工作状态，一旦发现异常现象，应在适当时间关机，并请专业人员维修，不可自行拆修。

2　机床本体

2.1　机床结构

机床本体由床身、坐标工作台、运丝机构、丝架（高速走丝机）或立柱（低速走丝机）、工作液箱、附件和夹具等几部分组成。

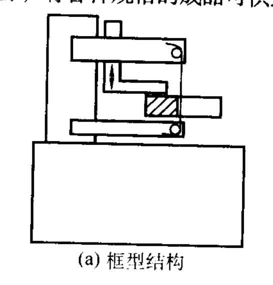
床身、立柱的结构类型见图 3.2-39。其中框结构和 C 型结构适用于中小工件加工，而龙门型结构的布局呈对称型，刚性强，有利于热平衡，适用于大型及精密工件加工。

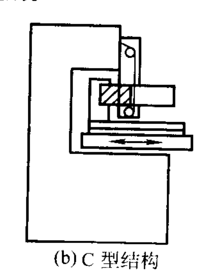
（1）床身

床身是支承座标工作台、走丝机构和丝架的基体。它应具有一定的刚度和强度，备有台面水平调整机构和便于搬运的吊装孔或吊钩。

床身主要有铸造结构和焊接结构两种形式。

铸造结构应用较多。为保证足够的刚度，在台面下和侧壁上制有纵、横交错的加强筋。在选择材料和制造工艺方面，要利于消除残余应力，以保证床身各部分尺寸及相对位置的稳定。铸造结构床身刚度较好，强度较高，长时间使用能保持原有的精度。但这种结构笨重，制造时需要先做木模，加工量大，周期长。焊接结构轻便，制造容易，周期短。但加工工艺要求严格，要采用消除残余应力的措施，否则易产生变形。


(a) 框型结构


(b) C 型结构

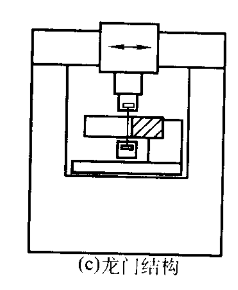

(c)龙门结构

图 3.2-39　床身的结构类型

（2）坐标工作台

工作台滑板的结构类型见图 3.2-40。其中图 3.2-40a 和图 3.2-40b 适用于中小工件，而图 3.2-40c 和图 3.2-40d 适用于中大型工件加工。

各类滑板结构的承重能力见图 3.2-41。

通常 X、Y 坐标工作台是用来装夹被加工的工件，X 轴和 Y 轴由控制台发出进给信号，分别控制两个步进（伺服）电动机，进行预定的加工。坐标工作台主要由滑板、导轨、丝杠运动副、齿轮传动机构四部分组成（见图 3.2-42）。

1）滑板　滑板主要由下滑板 1、中滑板 2、上滑板 3（工作台）组成。通常下滑板与床身固定联接；中滑板置于下滑板之上，运动方向为坐标 Y 方向；上滑板置于中滑板之上，运动方向为坐标 X 方向（见图 3.2-42）。其中上、中滑板一端呈悬臂形式，以放置步进（伺服）电动机。

为在减轻质量的条件下，增加滑板的结合面，提高工作

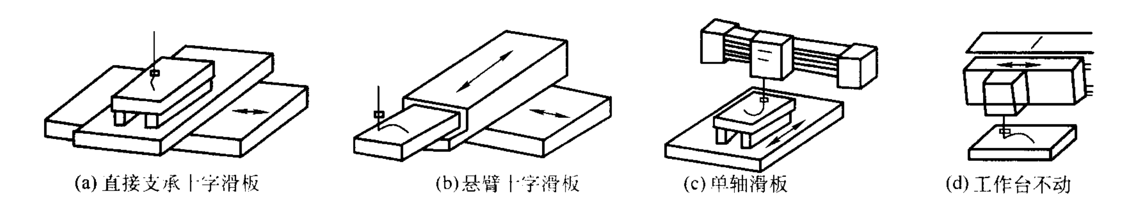


图 3.2-40　工作台滑板的结构类型

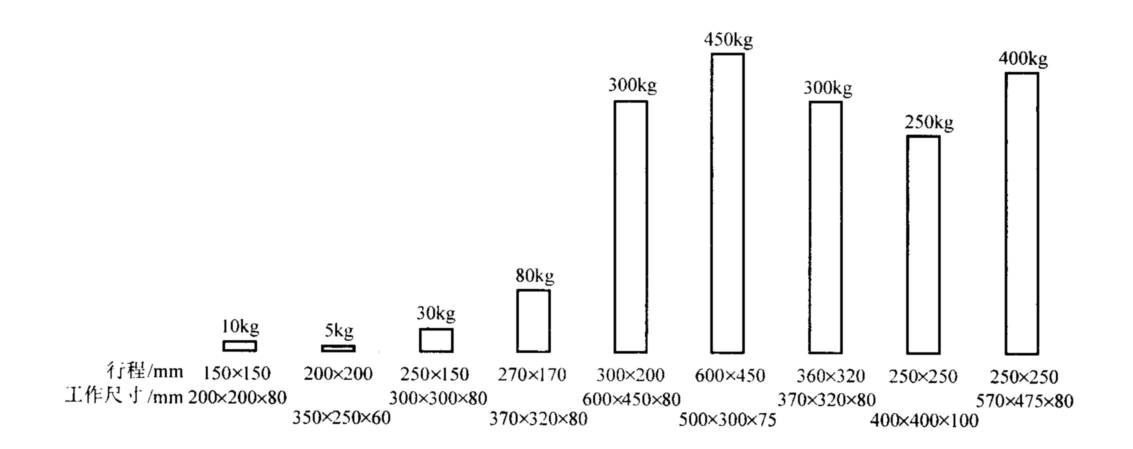


图 3.2-41　各类滑板结构允许的工件质量

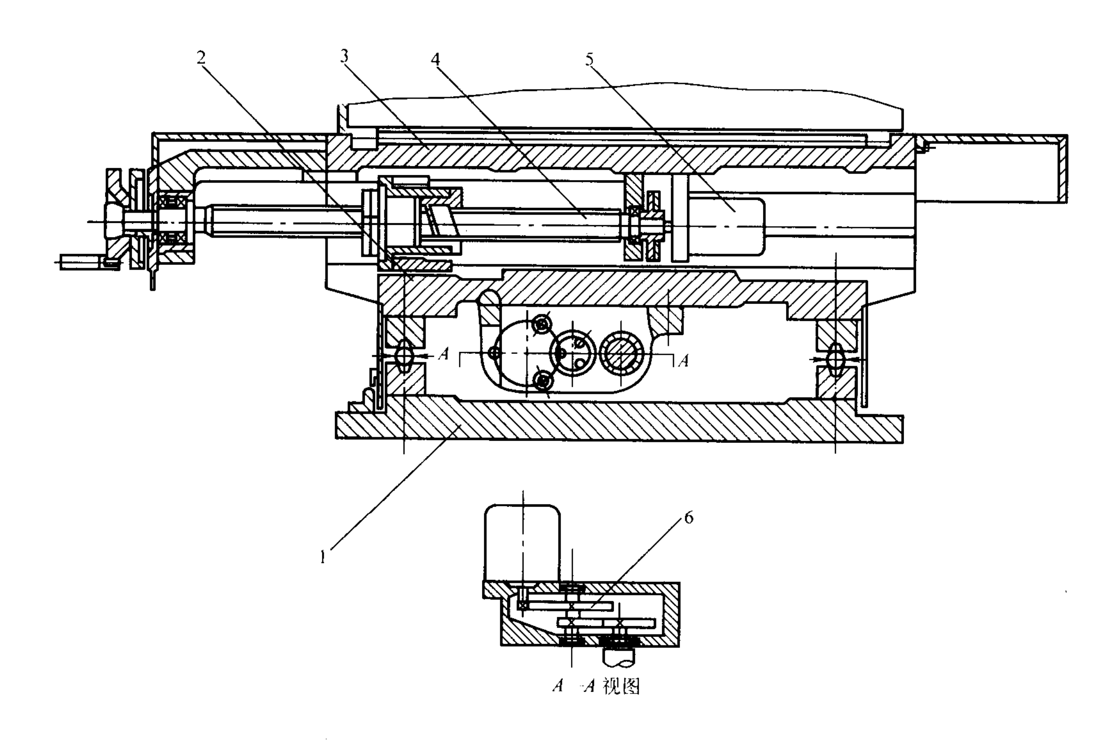


图 3.2-42　坐标工作台结构

1—下滑板；2—中滑板；3—上滑板（工作台）；4—滚珠丝杠；5—步进电动机；6—齿轮传动机构

台的刚度和强度，应使上滑板在全行程中不伸出中滑板，中滑板不伸出下滑板。这种结构使坐标工作台所占面积较大，通常电机置于滑板下面，增加了维修的难度。

2）导轨　坐标工作台的纵、横滑板是沿着导轨往复移动的。因此，对导轨的精度、刚度和耐磨性有较高的要求。此外，导轨应使滑板运动灵活、平稳。

线切割机床常选用滚动导轨。因为滚动导轨可以减少导轨间的摩擦阻力，便于工作台实现精确和微量移动，且润滑方法简单。缺点是接触面之间不易保持油膜，抗振能力较差。滚动导轨有滚珠导轨、滚柱导轨和滚针导轨等几种型式。在滚珠导轨中，滚珠与导轨是点接触，承载能力不能过大。在滚柱导轨和滚针导轨中，滚动体与导轨是线接触，因此有较大承载能力。为了保证导轨精度，各滚动体的直径误差一般不应大于 0.001 mm。

在线切割机床中，常用的滚动导轨有以下两种。

① 力封式滚动导轨　力封式是借助运动件的重力将导轨副封闭而实现给定运动的结构形式。

图 3.2-43 是力封式滚动导轨结构简图。承导件有两根 V 形导轨。运动件上两根与承导件相对应的导轨中，一根是 V 形导轨，另一根是平导轨。这种结构具有较好的工艺性、制造、装配、调整都比较方便；同时，导轨与滚珠的接触面也较大，受力较均匀，润滑条件较好（因 V 形面朝上，易于贮油）。缺点是滑板可能在外力作用下，向上抬起，并因此破坏传动。当搬运具有这种导轨型式的机床时，必须将移动件夹紧在床身上。

对于滚柱、滚针导轨，也常采用上述组合方式，因此在大、中型线切割机床中得到广泛使用。

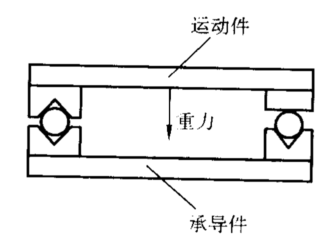


图 3.2-43　力封式滚动导轨结构简图

② 自封式滚动导轨　图 3.2-44 是自封式滚动导轨结构简图。自封式是指由承导件保证运动件按给定要求运动的结构形式。其优点是运动受外力影响，防尘条件好。但结构复杂，每个 V 形槽两侧面受力不均，工艺性也较差。

此外，还有“角尺”型滚珠导轨、弧型导轨等组合结构。

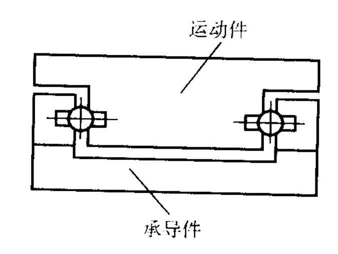


图 3.2-44　自封式滚动导轨结构简图

在大、中型线切割机尤其是低速走丝线切割机床上，普遍采用导向导轨和承载导轨。导向导轨配置在切割加工区域内，两侧有承载导轨。导向导轨与承载导轨皆为精密滚针导轨，有预应力的滚针镶嵌在淬硬、磨光的钢条上。这种结构的导轨精度高、刚度好、承载支点跨距大；同时热变形对称、直线性好、横向剪切力不变。

工作台导轨一般采用镶件式。由于滚珠、滚柱和滚针与导轨是点接触或线接触，导轨单位面积上承受的压力很大，同时滚珠、滚柱和滚针硬度较高，所以导轨应有较高的硬度。为了保证运动件运动的灵活性和准确性，导轨的表面粗糙度 R_a 值应在 0.8 μm 以下，工作面的平面度应为 0.005/400。导轨的材料一般采用合金工具钢（如 CrWMn、GCr15 等）。为了最大限度地消除导轨在使用中的变形，导轨应进行冰冷处理和低温时效。

3）丝杠传动副　工作台传动丝杠副有滑动丝杠副和滚动丝杠副两种结构形式，分别如图 3.2-45 和图 3.2-46。滑动丝杠副结构简单、成本低、传动效率低、灵敏度差、寿命短；而滚动丝杠副结构复杂、成本高、传动效率高、灵敏度高、寿命长。

丝杠传动副的作用是将传动电动机的旋转运动变为滑板的直线运动。要使丝杠副传动精确，丝杠与螺母就必须精确，一般应保证 6 级或高于 6 级的精度。

丝杠副的传动齿形一般分三角普通螺纹、梯形螺纹和圆弧形螺纹三种。三角普通螺纹和梯形螺纹结构简单、制造方便、精度易于保证。因此，在中、小型线切割机床的丝杠传动副中得到广泛应用。这种丝杠副传动为滑动摩擦，传动效率较低。大、中型线切割机床常采用圆弧形螺纹滚珠丝杠。

滚珠丝杠传动副目前广泛用于线切割机床坐标工作台滑板的运动传动结构中。滚珠丝杠传动副能够有效地消除丝杠与螺母间的配合间隙，可使滑板的往复运动灵活、精确。

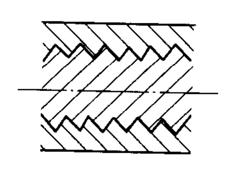


图 3.2-45　滑动丝杠副

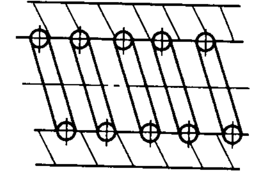


图 3.2-46　滚动丝杠副

丝杠和螺母之间不应有传动间隙，以防止转动方向改变时出现空程现象，造成加工误差。所以，一方面要保证丝杠和螺母齿形与螺距等方面的加工精度；另一方面要消除丝杠和螺母间的配合间隙，通常有以下两种方法。

① 轴向调节法　利用双螺母弹簧消除丝杠副传动间隙的方法是简便易行的（见图 3.2-47）。当丝杠正转时，带动螺母 1 和滑板一起移动；当丝杠反转时，则推动副螺母 3，通过弹簧 2 和螺母 1，使滑板反向移动。装配和调整时，弹簧的压缩状态要适当。弹力过大，会增加丝杠对螺母和副螺母之间的摩擦力，影响传动的灵活性和使用寿命；弹力过小，在副螺母受丝杠推动时，弹簧推动不了滑板，不能起到消除间隙的作用。

② 径向调节法　图 3.2-48 为径向调节丝杠副间隙的结构。螺母一端的外表面呈圆锥形，沿径向铣出三个凸槽，颈部壁厚较薄，以保证螺母在径向收缩时带有弹性。圆锥底部处的外圆柱面上有螺纹，用带有锥孔的调整螺母与之配合，使螺母三爪径向压向或离开丝杠，消除螺纹的径向和轴向间隙。

4）齿轮副　步进电动机与丝杠间的传动通常采用齿轮副来实现。由于齿侧间隙、轴和轴承之间的间隙及传动链中的弹性变形的影响，当步进电动机主轴上的主动齿轮改变转动方向时，会出现传动空程。为了减少和消除齿轮传动空程，应当采取以下措施。

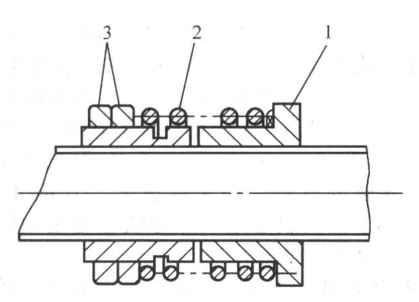


图 3.2-47　双螺母弹簧消除间隙机构
1—螺母；2—弹簧；3—副螺母

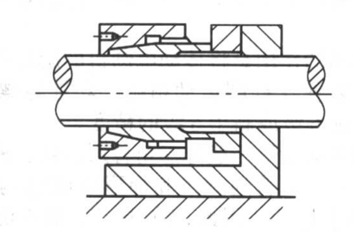


图 3.2-48　径向调节丝杠副间隙的结构

① 采用尽量少的齿轮减速级数，力求从结构上减少齿轮传动精度的误差。

② 采用齿轮副中心距可调整结构。通过改变步进电机的固定位置来实现。

③ 将被动齿轮或介轮沿轴向剖分为双轮的形式。装配时应保证两轮齿廓分别与主动轮齿廓的两侧面接触，当步进电动机变换旋转方向时，丝杠能迅速得到相应反映。

步进（伺服）电动机的安装位置有两种：一种是置于滑板的一侧端部；另一种是固定在可移动滑板的下面，齿轮传动副也固定在滑板下面的相应位置上。步进电动机的固定位置对滑板的结构形式有着很大的影响。

(3) 采用直线电机作伺服单元的低速走丝线切割机床（如图 3.2-49）。

1）直线电机的动作原理　如图 3.2-50 所示，直线同步电机（LSM）是把旋转型的交流（AC）伺服电机展成直线平面型电机，从原理上讲，它是遵照“弗来明”左手定律产生推力。在动作原理上，它是由若干安装在机床底座的永久磁针（定子）和环绕滑架上叠钢片铁芯线圈（动子）组成，利用动力脉冲电流并使其相位错移 90°产生的磁场与定子永磁磁场相互作用而产生的电磁推力，带动负载左右移动。推力是由电流（磁砀）的大小决定的。再者，无铁心 AC 电机是相对带 AC 铁心的电机而言，即没有铁心的电机。因没有铁心，所以铁心与磁铁之间不会产生吸力，而且齿槽效应极小，很容易进行控制，这是能够使人理解的。但是，由于没有所谓铁心的增幅（放大）功能，所以推力较小是它的一个缺点。

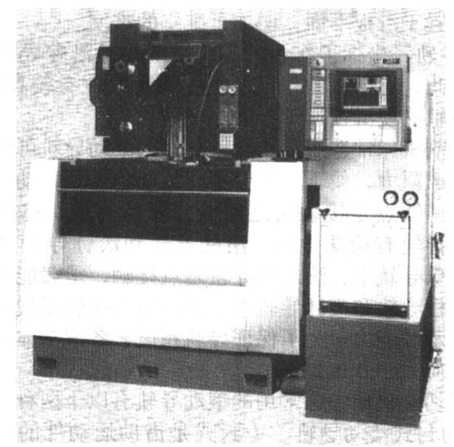


图 3.2-49　SODICK 采用直线电机的低速走丝线切割机床

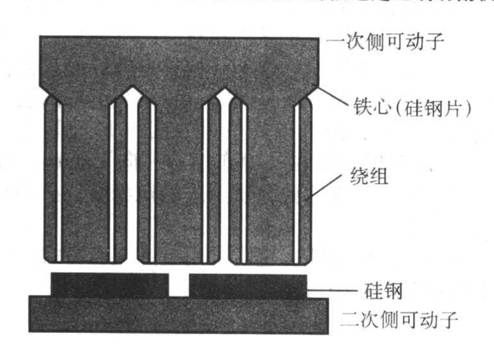
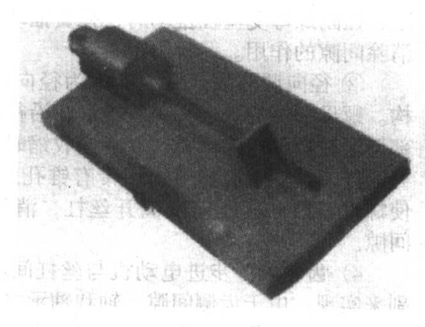


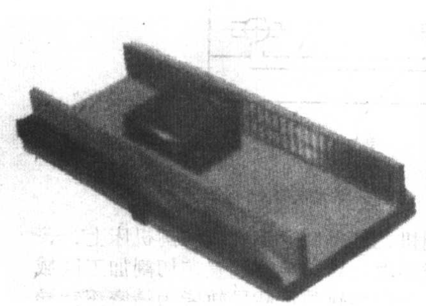
图 3.2-50　直线电机的结构图

2）直线电机的优缺点　旋转电机驱动方式和直线电机驱动方式的系统结构对比如图 3.2-51a、b 所示。

直线电机的最大优点，可以说是避免了把旋转变换成直线进给的滚珠丝杆所引起的诸多问题（如间隙等）。为保持机床的高速、高精度，滚珠丝杠的支承机构也曾经是一个薄弱环节。还有一个优点就是传递效率较高。直线电机加速所需要的电能，能全部被转换成动能。另外，电机驱动系统中驱动滚珠丝杠与电机本身的旋转运动中，因其摩擦阻力而使能量受到损失。但是，同旋转电机相比，直线电机的驱动力较小，加之直线电机不存在滚珠丝杠的减速机构反而比旋转电机需要更大的推力，因此驱动相同机床需要较大功率的直线电机。同时，因要将所配置的结构安装在机床的中心部位，所以当电机温度上升时，就很难保持机床的精度。因此，使用直线电机驱动的线切割机床必须克服这一缺点。



(a)旋转电机驱动方式



(b)直线电机驱动方式

图 3.2-51　旋转电机驱动系统和直线电机驱动系统



SODICK公司开发出的采用直线电机作伺服单元的低速走丝线切割机床比该公司以前生产的采用旋转电机作伺服单元的低速走丝线切割机床具有机床占地面积小，加工速度高及精度好的优点。

2.2　运丝系统

（1）高速走丝线切割机的运丝系统

高速走丝线切割机床的运丝系统由走丝机构、线架、导轮等组成。

1）走丝机构　高速走丝机构主要用来带动电极丝按一定线速度移动，并将电极丝整齐地排绕在储丝筒上。对高速走丝机构的要求如下。

① 高速走丝机构的储丝筒转动时，还要进行相应的轴向移动，以保证电极丝在储丝筒上整齐排绕。

② 储丝筒的径向跳动和轴向窜动量要小。

③ 储丝筒能正反向旋转，电极丝的走丝速度在2～11 m/s范围内无级或有级可调，或恒速运转。

④ 走丝机构最好与床身相互绝缘。

⑤ 传动齿轮副、丝杠副应具备润滑措施。

高速走丝机构由储丝筒组合件、上下滑板、齿轮副、丝杠副、换向装置和绝缘件等部分组成（见图 3.2-54）。

储丝机构有单机快速往返走丝方式和双机快速往返走丝方式，分别如图 3.2-52 和图 3.2-53。前者结构简单、往返频繁、振动大、电极丝绕得少、丝损快、影响加工精度；而后者的结构复杂、往返次数少、震动小。绕电极丝愈长、丝损愈慢，对提高加工精度有利。

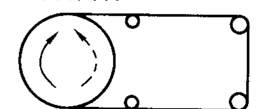


图 3.2-52　单机快速往返走丝

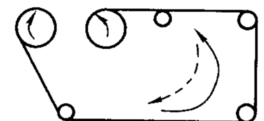


图 3.2-53　双机快速往返走丝

通常储丝筒组合件如图 3.2-54 所示。储丝筒 1 由电动机 2 通过弹性圆柱销联轴器 3 带动，以1 450 r/min 的转速正反向转动。储丝筒另一端通过三对齿轮减速后带动丝杆 4。储丝筒、电动机、齿轮都安装在两个支架 5 及 6 上。支架及丝杠则安装在滑板 7 上。螺母 9 装在底座 8 上，滑板在底座上来回移动。螺母具有消除间隙的副螺母及弹簧，齿轮及丝杠螺距的搭配使滚筒每旋转一圈滑板移动 0.20 mm。所以，该储丝筒适用于 ϕ0.20 mm 以下的钼丝。

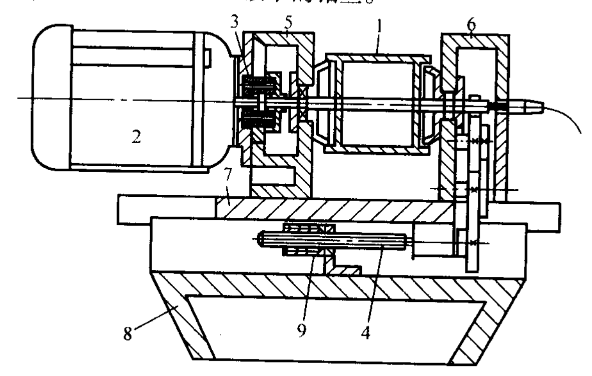


图 3.2-54　储丝筒组合件

1—储丝筒；2—电动机；3—联轴器；4—丝杠；5、6—支架；7—滑板；8—底座；9—螺母

储丝筒运转时应平稳，无不正常振动。滚筒外圆振摆应小于 0.03 mm，反向间隙应小于 0.05 mm，轴向窜动应彻底消除。

脉冲电源的负端通过碳刷送到储丝筒轴的尾部，然后传到钼丝上，碳刷应保持良好接触，防止机油或其他脏物进入接触区。但大多数机床是通过进电块进电的。

储丝筒本身作高速正反向转动，电动机、滚筒及丝杠的轴承应定期拆洗并加润滑脂，换油期限可根据使用情况具体决定。其余中间轴、齿轮、燕尾导轨及丝杠、螺母等每班应注润滑油一次。随机附有摇手把一只，可插入滚筒尾部的齿轮槽中摇动储丝筒，以便绕丝。

2）储丝筒旋转组合件　储丝筒旋转组合件主要由储丝筒、联轴器、轴承座组成。

① 储丝筒　储丝筒是电极丝稳定移动和整齐排绕的关键部件之一，一般用 45 钢制造。为减小转动惯量，筒壁应尽量薄，按机床规格不同，选用范围为 1.5～3 mm。为进一步降低转动惯量，也可选用铝镁合金材料制造。

储丝筒壁厚要均匀，工作表面要有较好的表面粗糙度，一般 R_a 为 0.8 μm。为保证丝筒组合件动态平衡，应严格控制内孔、外圆对支承部分的同轴度。

储丝筒与主轴装配后的径向跳动量应不大于 0.01 mm。一般装配后，以轴的两端中心孔定位，重磨储丝筒外圆和与轴承配合的轴径，并进行动平衡检验。

② 联轴器　走丝机构中运动组合件的电动机轴与储丝筒中心轴，一般不采用整体的长轴，而是利用联轴器将二者联在一起。由于储丝筒运行时频繁换向，联轴器瞬间受到正反剪切力很大，因此多用弹性联轴器和摩擦锥式联轴器。

弹性联轴器（见图 3.2-55）结构简单，惯性力矩小，换向较平稳，无金属撞击声，可减小对储丝筒中心轴的冲击。弹性材料采用橡胶、塑料或皮革。这种联轴器的优点是，允许电动机轴与储丝筒轴稍有不同心和不平行（如最大同轴度误差允许为 0.2～0.5 mm，最大平行度误差为 1°），缺点是由它连接的两根轴在传递扭矩时会有相对转动。

摩擦锥式联轴器（见图 3.2-56）可带动转动惯量较大的大、中型机床储丝筒旋转组合件。此种联轴器可传递较大的扭矩，同时在传动负荷超载时，摩擦面之间的滑动还可起到过载保护作用。

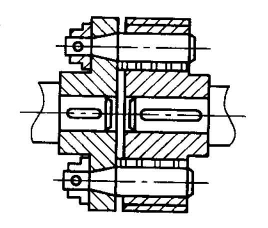


图 3.2-55　弹性联轴器

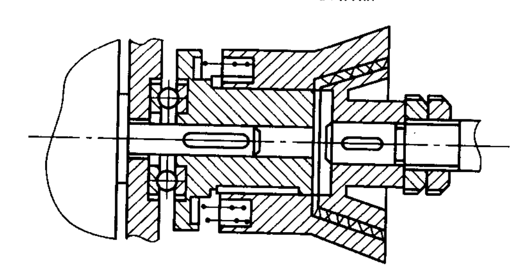


图 3.2-56　摩擦锥式联轴器

因为锥形摩擦面会对电动机和储丝筒产生轴向力，所以在电机主轴的滚动支承中，应选用向心止推轴承和单列圆锥滚子轴承。另外，还要正确选用弹簧规格。弹力过小，摩擦

面打滑，使传动不稳定或摩擦面过热烧伤；弹力过大，会增大轴向力，影响中心轴的正常转动。

磁力联轴器是依靠磁性力无接触式联接的，保留了传统联轴器的优点。从结构上分套筒式磁力联轴器和圆盘式磁力联轴器两种形式。

套筒式磁力联轴器的主动磁极 3 和从动磁极 2 均可为圆筒状或以若干块磁铁排列成圆筒状，并用粘接剂分别将其固定于主动轴套 4 外表面上和从动轴套 1 内表面上，主动轴 6 与被动轴 7 间用键 5、8 连接。主动磁极 3 和从动磁极 2 之间有一定间隙，其目的为：两磁极之间无摩擦，靠磁场连接；被联接两轴因受制造及安装误差，承载后变形及温度变化等因素影响，往往不能严格对中心。留有一定间隙，可补偿这一不足，还可适当降低加工及装配要求。该套筒式联轴器因磁场面积大，可以传递较大扭矩。其磁场连接力可以通过改变主动轴套 4 和从动轴套 1 的配合长度来进行调整（见图 3.2-57）。

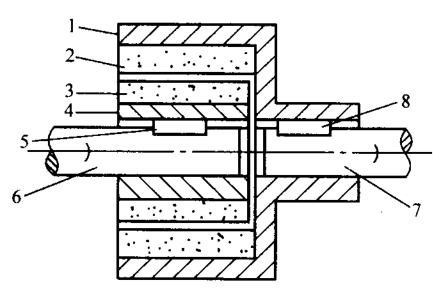


图 3.2-57　套筒式磁力联轴器

圆盘式磁力联轴器的联轴器主动磁极 3 和从动磁极 2 均可为圆盘状或以若干块磁铁排列成圆形射线状，并用粘接剂分别将其固定于主动轴套 4 和从动轴套 1 的大端面上。由于圆盘式联轴器磁场面积小，所以传递扭矩较小，并且体积也相应较小。其磁场连接力可以通过改变主动磁极 3 和从动磁极 2 之间的距离来进行调整（见图 3.2-58）。

由于磁力联轴器轴与轴之间没有零件直接连接，而是靠磁场联接来传递扭矩，因此电动机换向时，转动惯量被磁力线的瞬时扭曲抵消；在超负荷时，键 8、5 连接的主动轴 7 与从动轴 6 可以自动打滑脱开，起到安全离合器的作用，不会损坏任何零部件。

主动磁极 3 和从动磁极 2 均用强的永磁材料制成，例如铁氧体、钕铁硼、稀土合金等。

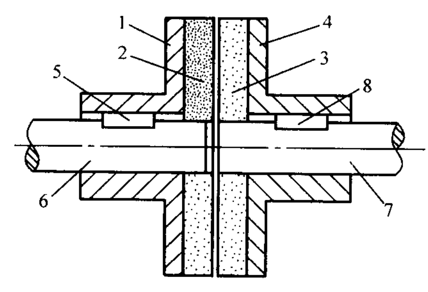
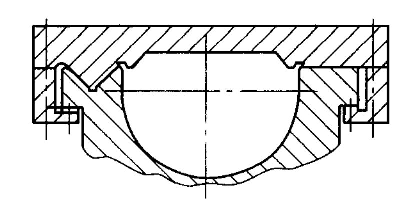


图 3.2-58　圆盘式磁力联轴器

3）上下滑板　走丝机构的上下滑板多采用下面两种滑动导轨。

① 燕尾形导轨。这种结构紧凑，调整方便。旋转调整杆带动塞铁，可改变导轨副的配合间隙。但该结构制造和检验比较复杂，刚性较差，传动中摩擦损失也较大。

② 三角、矩形组合式导轨。图 3.2-59 为三角、矩形组合式导轨结构。导轨的配合间隙由螺钉和垫片组成的调整环节来调节。


图 3.2-59　三角、矩形组合式导轨结构

由于储丝筒走丝机构的上滑板一边装有运丝电动机，储丝筒轴向两边负荷差较大。为保证上滑板能平稳地往复移动，应把下滑板设计得较长以使走丝机构工作时，上滑板部分可始终不滑出下滑板，从而保持滑板的刚度、机构的稳定性及运动精度。

4）齿轮副与丝杠副　走丝机构上滑板的传动链是由 2～3级减速齿轮副和一级丝杠副组成的。它使储丝筒在转动的同时，做相应的轴向位移，保证电极丝整齐地排绕在储丝筒上。

在大、中型线切割机床中，走丝机构常常通过配换齿轮改变储丝筒的排丝筒的排丝距离，以适应排绕不同直径电极丝的要求。

丝杠副一般采用轴向调节法来消除螺纹配合间隙。为防止走丝电动机换向装置失灵，导致丝杠副和齿轮副损坏，在齿轮副中，可选用尼龙轮代替部分金属齿轮。这不但可在电动机换向装置失灵时，由于尼龙齿轮先损坏，保护丝杠副与走丝电动机，还可减少振动和噪声。

5）绝缘、润滑方式

① 走丝机构的绝缘一般采用绝缘垫圈和绝缘垫块，方法简单易行。在一些机床中，也有用绝缘材料制成连接储丝筒和轴的定位板实现储丝筒与床身绝缘的。这种方法的缺点是，储丝筒组合件装卸时精度易改变。

② 润滑方式有人工润滑和自动润滑两种。人工润滑是操作者用油壶和油枪周期地向相应运动副加油；自动润滑为采用灯芯润滑、油池润滑或油泵供油的集中润滑系统。

采取润滑措施，能减少齿轮副、丝杠副、导轨副和滚动轴承等运动件的磨损，保持传动精度；同时能减少摩擦面之间的摩擦阻力及其引起的能量损失。此外，还有润滑接触面和防锈的作用。

6）丝架、导轮部件的结构　丝架的主要功用是在电极丝按给定线速度运动时，对电极丝起支撑作用，并使电极丝工作部分与工作台平面保持一定的几何角度。对丝架的要求如下。

① 具有足够的刚度和强度。在电极丝运动（特别是高速走丝）时，不应出现振动和变形。

② 丝架的导轮有较高的运动精度，径向偏摆和轴向窜动不超过 5 μm。

③ 导轮与丝架本体、丝架与床身之间有良好的绝缘性能。

④ 导轮运动组合件有密封措施，可防止带有大量放电产物和杂质的工作液进入导轮轴承。

⑤ 丝架不但能保证电极丝垂直于工作台平面，在具有锥度切割功能的机床上，还具备能使电极丝按给定要求保持与工作台平面呈一定角度的功能。

丝架按功能可分为固定式、升降式和偏移式三种类型。按结构可分为悬臂式和龙门式两种类型。

悬臂式固定丝架主要由丝架本体、导轮运动组合件及保持器等组成。

7）丝架本体结构　丝架机构有单柱支撑双臂悬梁式、龙门式、跨距可调式和偏移式四种结构，分别如图 3.2-60～



图 3.2-63 所示。单柱支撑双臂悬梁式较适用于中小型切割较薄工件的机床；跨距可调式适用于工件厚度变化范围大的机床；龙门式适用于大型机床；而偏移式适用于具有锥度切割功能的机床。

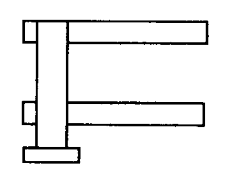


图 3.2-60　单柱支撑双臂悬梁式

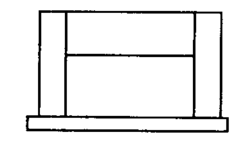


图 3.2-61　龙门式

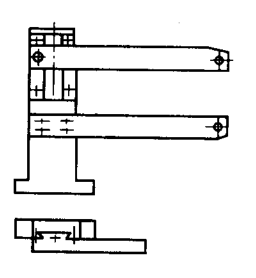


图 3.2-62　跨距可调式

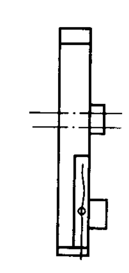


图 3.2-63　偏移式

目前，中、小型线切割机床的丝架本体常采用单柱支撑双臂悬梁式结构。由于支撑电极丝的导轮位于悬臂的端部，同时电极丝保持一定张力，因此应加强丝架本体的刚度和强度，可使丝架的上下悬臂在电极丝运动时不致振动和变形。

为了进一步提高刚度和强度，应在上下悬臂间增加加强筋的结构。大型线切割机床的丝架本体有的采用龙门结构。这时，工作台滑板只沿一个坐标方向运动，另一个坐标方向的运动通过架在横梁上的丝架滑板来实现。

此外，针对不同厚度的工件，还有采用上下丝臂之间的跨距可调式活动丝架结构（见图 3.2-64）。活动丝臂在导轨上滑动，上下移动的距离由丝杠副调节。松开固定螺钉时，旋转丝杠带动固定于上丝臂体的丝母，使上丝臂移动。调整完毕后，拧紧固定螺钉，上丝臂位置便固定下来。为了适应丝架丝臂张开高度的变化，在丝架上下部分应增设副导轮（见图 3.2-65）。

图 3.2-66 是升降式活动线架实例。

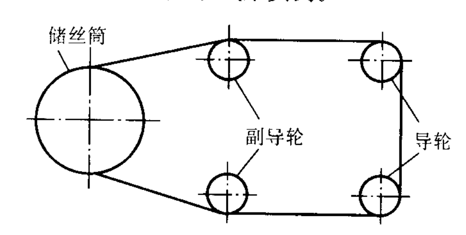


图 3.2-64　可调式丝架本体结构示意图

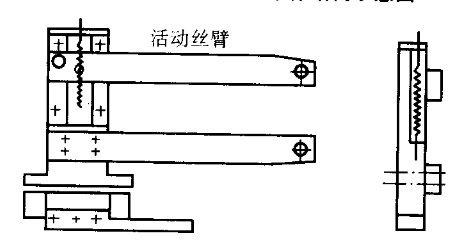


图 3.2-65　可移动丝臂走丝示意图

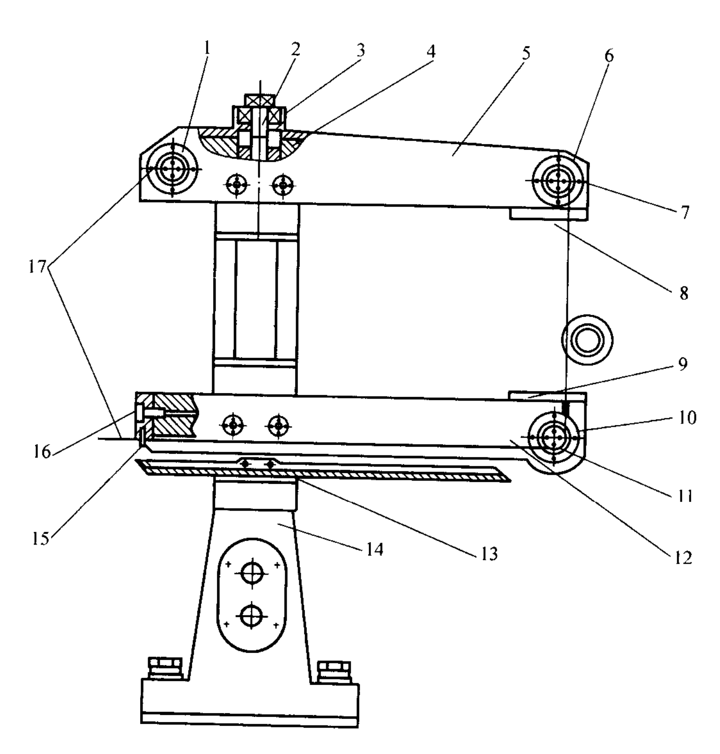


图 3.2-66　升降式活动线架

1—后导轮帽；2—升降丝杆；3—止推轴承；4—滑块；5—上丝臂；6—上导轮套；7—上导轮；8—上出水口；9—下出水口；10—下导轮套；11—下导轮；12—下丝臂；13—挡水板；14—丝架立柱；15—挡丝块；16—挡丝块座；17—电极丝

① 线架结构　立柱14是根据工作台面高度、线架间距以及上下支架厚度等所设计的高为580 mm的方形空心柱，下丝臂12直接固定在立柱上，上丝臂5则固定在滑块4上，滑块本身是一个丝杆螺母，并由升降丝杆2带动上下移动，以改变线架的间距。

② 跨距的调整　如图3.2-67所示，首先松开锁紧螺钉2，然后用手柄摇动升降丝杆6，使滑块7上下移动，因为上丝臂9是用螺钉固定在滑块7上，只要滑块一移动，上丝臂就会跟随上下平移，移到所需要的间距时，再拧紧锁紧螺钉2即可。由于滑块与立柱的接触面做成45°的导向斜槽，保证上丝臂的平移锁紧可靠。由于上丝臂移动幅度较大，经常要高于卷丝筒，所以在上丝臂的后面增设一个后导轮组，导轮可轴向调节，以保证导轮V形槽在丝臂槽的中间位置。

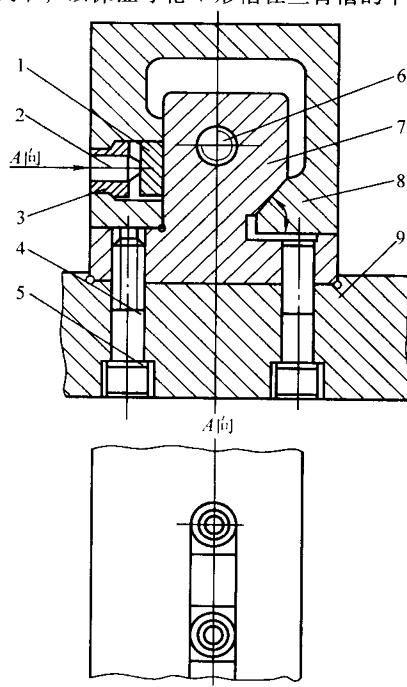


图3.2-67　上下丝臂间跨距调整结构图

1—弹簧；2—锁紧螺钉；3—锁紧螺母；4—内六角螺钉；5—弹簧垫圈；6—升降丝杆；7—滑块；8—立柱；9—上丝臂

③ 电极丝垂直度的调节　电极丝是从卷丝筒拉出，经过后导轮（或称导向导轮）、上导轮和下导轮再回到卷丝筒，因此，只要调整上、下导轮的位置，就可调整电极丝相对于工作台面的垂直度。其导轮组结构如图3.2-68所示。

a）X方向的垂直度的调整　因为上导轮套6与上丝臂10的孔的中心有0.5 mm的偏心，所以，只要旋转上导轮套6就可以达到调整电极丝在X方向的垂直度。在200 mm全高范围内垂直度小于0.01 mm。

b）Y方向的垂直度的调整　因为下导轮套6是装在下丝臂10的孔内，而下丝臂的孔又开有一段螺纹，其螺纹与下导轮套的螺纹尺寸一样。所以，只要旋转下导轮套，就可带动导轮在Y方向的移动（即作轴向移动），移动量为1 mm。这样就可以调整电极丝在Y方向对坐标工作台面的垂直度，同样要求在200 mm全高范围内垂直度小于0.01 mm。

④ 电极丝的进电方式　大厚度切割由于线架间的跨距较大，脉冲电源输出的脉冲电流需经过一段较长的电极丝方能到放电点，电极丝电阻不仅要耗损脉冲能量，而且会给加工稳定性带来不良影响。为此设计了如图3.2-68中所示的进电方式，脉冲电流直接从上下导轮轴上引入，以减少电极丝电阻的影响。导轮的一端做成60°的锥孔，导电柱4的一端则做成60°锥头，与导轮轴相配。导电柱4是用电动机上

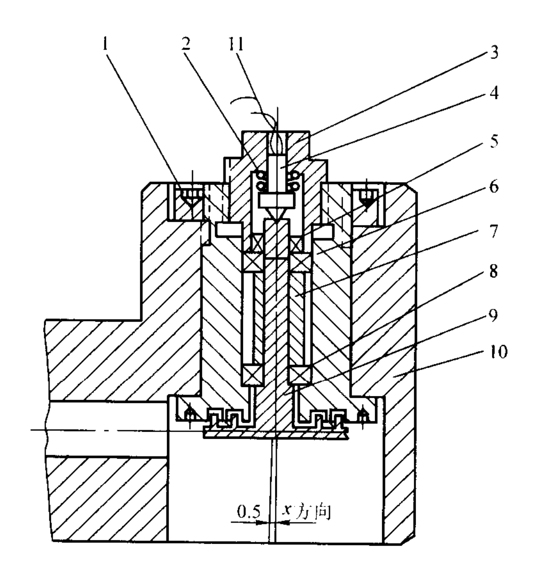


图3.2-68　上（下）导轮组结构图

1—螺母；2—弹簧；3—锁紧螺母；4—导电柱；5—六角螺母；6—上（下）导轮套；7—导轮轴套；8—轴承；9—导轮；10—上（下）丝臂；11—高频电源引进线

的电刷材料做成的，它的导电性能、耐磨性能以及润滑性能都比较好。导电柱靠弹簧的弹力来保证与导轮轴相接触。线架立柱用绝缘套和绝缘垫与床身绝缘。这种进电方式可减少电极丝的机械磨损，进电靠近放电区有利于提高切割速度和加工稳定性。但这种进电方式仅适用于金属导轮，对陶瓷导轮和蓝宝石导轮不宜采用这种进电方式，只能在上下导轮附近用导电块进电。

8）导轮部件结构

① 对导轮运动组合件的要求

a）导轮V形槽面应有较高的精度。V形槽底的圆弧半径必须小于选用的电极丝半径，保证电极丝在导轮槽内运动时不产生轴向移动。

b）在满足一定强度要求下，应尽量减轻导轮质量，以减少电极丝换向时的电极丝与导轮间的滑动摩擦。导轮槽工作面应有足够的硬度，以提高其耐磨性。

c）导轮装配后转动应轻便灵活，尽量减小轴向窜动和径向跳动。

d）进行有效的密封。以保证轴承的正常工作条件。

导轮零件典型结构及其他使用要求见表3.2-5。

② 导轮运动组合件的结构　导轮运动组合件结构主要有悬臂支承导轮组合和双支承导轮组合两种方式，分别如图3.2-69和图3.2-70所示。

悬臂支承结构简单，上丝方便。但因悬臂支承，张紧的电极丝运动的稳定性较差，难以维持较高的运动精度，同时也影响导轮和轴承的使用寿命。

双支承结构为导轮居中，两端用轴承支承，结构较复杂，上丝较麻烦。但此种结构的运动稳定性较好，刚度较高，不易发生变形及跳动。

另外还有双轴尖支承结构，该结构中导轮两端加工成30°的锥形轴尖，硬度在60HRC以上。轴承由红宝石或锡磷青铜制成。该结构易于保证导轮运动组合件的同轴度，导轮轴向窜动和径向跳动量可控制在较小的范围内。缺点是轴尖运动副摩擦力大，易于发热和磨损。为补偿轴尖运动副的磨损，利用弹簧的作用力使运动副良好接触。

此外，导轮支承有的还采用滑动支承结构。

③ 导轮的材料　为了保证导轮轴径与导向槽的同轴度，一般采用整体结构。导轮要求用硬度高、耐磨性好的材料制



表 3.2-5 导轮零件典型结构及使用要求

导轮类别	双支撑导轮				单支撑导轮
	A	B	C	D	
导轮结构图					
外径 D/mm	30				39
轴径 d/mm	4				4~5
V形槽角度 α	≤60°				≤60°
槽底圆弧半径 R/mm	≤0.05				≤0.05
V形槽表面粗糙度 R_a/μm	<0.63				
总长度 L/mm	26	34	26	34	32
螺纹主参数	—	M4×0.5	—	M4×0.5	M5×0.5
锥度	—	—	1:0.866		—

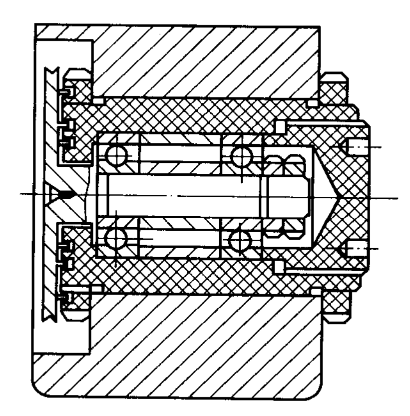


图 3.2-69 悬臂支承导轮组合

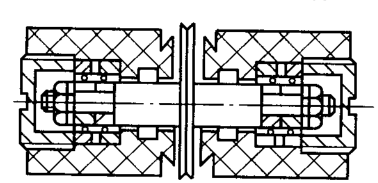


图 3.2-70 双支承导轮组合

表 3.2-6 导轮材料特性及其使用效果

导轮材料	导轮硬度	绝缘强度	一对导轮使用寿命
Cr12	58~62HRC	不绝缘	3个月
陶瓷	90~92HRA	绝缘	6个月
人造宝石	>1 740HV	4.8×10⁵ V/cm	1年

成（如GCr15、W18Gr4V），也可选用硬质合金或陶瓷材料制造导轮的镶件来增强导轮V形工作面的耐磨性和耐蚀性。

导轮零件材料特性及使用效果列于表3.2-6。

④ 导轮组合件的装配　对导轮组合件的装配要求：

a）装配成套的导轮组合件时，必须把导轮、轴承、衬套及其他零件清洗干净，轴承处填以高速润滑脂；

b）导轮V形槽的斜向圆跳动不大于5 μm；

c）导轮轴向窜动不大于2 μm；

d）导轮端面与导轮衬套端面间隙应在0.3~0.5 mm范围内；

e）装配后，导轮在高速运转时无杂音，转动轻便，平稳。

导轮组合件装配的关键是消除滚动轴承中的间隙，避免滚动体与套环工作表面在负荷作用下产生弹性变形，以及由此引起的轴向窜动和径向跳动。因此，常用对轴承施加预负荷的方法来解决。通常是在两个支承轴承的外环间放置一定厚度的定位环来获得轴承的预负荷。预加负荷必须适当选择，若轴承受预加负荷过大，在运转时会产生急剧磨损。同时，轴承必须清洗得很洁净，并在显微镜下检查滚道内是否有金属粉末、碳化物等。轴承经清洗、干燥后，填以高速润滑脂，起润滑和密封作用。

⑤ 电极丝保持器　保持器主要是对电极丝往复运动起限位作用，以提高位置精度。当保持器用于保证电极丝顺序排绕时，一般置于上、下丝臂靠近储丝筒的一端（见图3.2-72），使上、下保持器左右相对偏移。保持器的定位圆柱面应从相应中心位置对称地左右调节，使电极丝走向与导轮V形槽夹角尽量小，有利于导轮的正常使用。

图3.2-71的V形宝石架用于保持电极丝运动的位置精度时，不应对电极丝产生较大的压力。圆柱式保持器（见图3.2-72）可以用硬质合金或红宝石、蓝宝石制成。目前使用的有圆弧形、V形等方式。

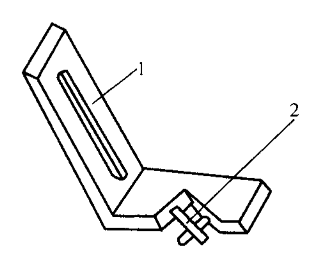


图 3.2-71 V形宝石架
1—保持器架；2—V形宝石保持器

(2) 低速走丝线切割机的运丝机构

一种低速走丝线切割机的送丝机构见图3.2-73。电极丝



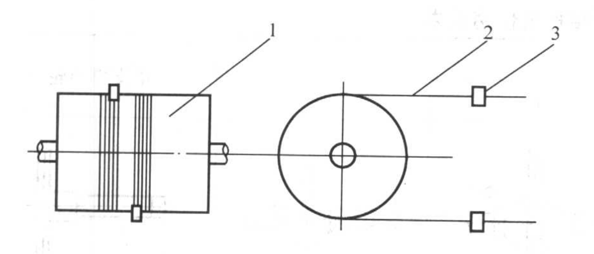


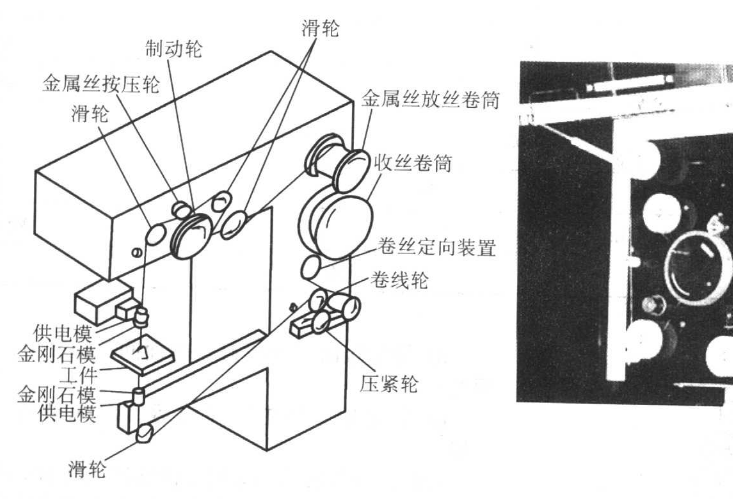
图 3.2-72 硬质合金保持器

1—储丝筒；2—钼丝；3—硬质合金块

由放丝卷筒送出，经一定的路径后由卷丝轮和压紧轮夹住，靠卷丝轮的等速回转，使电极丝以一定的速度移动，丝张力由机械式或电磁式的制动轮来设置。送丝路径上通常还装有一两个断丝检测微动开关，用于断丝报警和自动操作。废电极丝经排丝装置集中到收丝卷筒上或送到专门的收集器中。

走丝系统对加工精度影响很大，为了减轻电极丝的振动，应使上下导向器之间的跨度尽可能小（按工件厚度调整）。导向器通常为 V 形或圆孔模，用蓝宝石或金刚石制成。近年来有些机床在通过加工区后的回丝部分采用皮带夹送方式，以避免回丝过程中外力干扰对加工区电极丝张力的影响。

电极丝的进电部分一般在导向器附近，并使工作液先通过引电区和导向器再进入加工区，以保证电极丝通电部分的冷却。



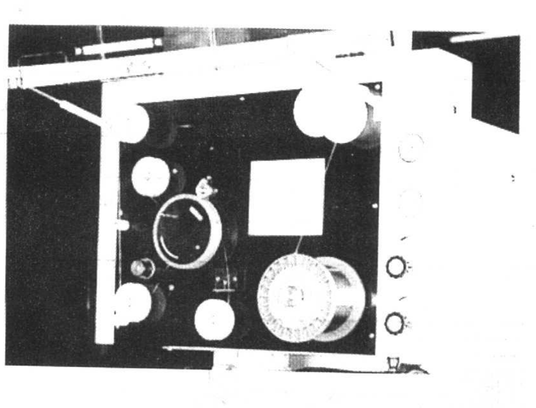


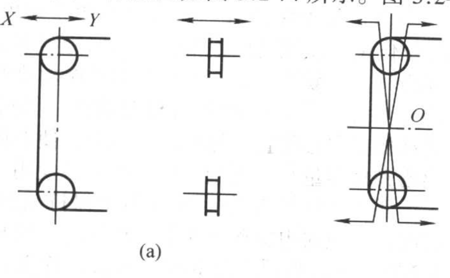
图 3.2-73 低速走丝线切割机床的送丝机构

2.3 锥度切割装置

（1）高速走丝锥度切割装置

为了切割有落料角的冲模和某些有锥度（斜度）的内外表面，有些线切割机床具有锥度切割功能。实现锥度切割的方法有多种，下面只介绍两种。

1）偏移式丝架　其工作原理如图 3.2-74 所示。图 3.2-74a 为上（或下）丝臂平动法，上（或下）丝臂沿 *X*、*Y* 方向平移，此法锥度不宜过大，否则导轮易损，工件上有一定的加工圆角。图 3.2-74b 为上、下丝臂同时绕一定中心移动的方法，如果模具刃口放在中心“*O*”上，则加工圆角近似为电极丝半径。此法加工锥度也不宜过大。图 3.2-74c 为上、下丝臂分别沿导轮径向平动和轴向摆动的方法，此法加工锥度不影响导轮磨损。最大切割锥度通常可以达到 1.5°。



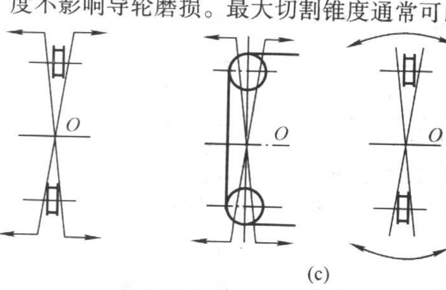


图 3.2-74 偏移式丝架实现锥度加工的方法

2）双坐标联动装置　主要依靠上导向器亦能作纵横两轴（称 *U*、*V* 轴）驱动，与工作台的 *X*、*Y* 轴在一起构成 *NC* 四轴同时控制，这种方式的自由度很大，依靠强有力的软件，可以实现上下异形截面形状的加工。最大的倾斜角度一般为 ±5°，有的甚至可达 30°（与工件厚度有关）。图 3.2-75、图 3.2-76 为加工实例。

（2）低速走丝锥度切割机构

最常用低速走丝锥度切割机构采用四轴联动方式，见图 3.2-77。这时上导向器亦能作纵横两轴（称 *U*、*V* 轴）运动，与工作台的 *X*、*Y* 轴在一起构成四轴同时数控。

图 3.2-78 为低速走丝线切割机床加工出的带锥度的回转零件。

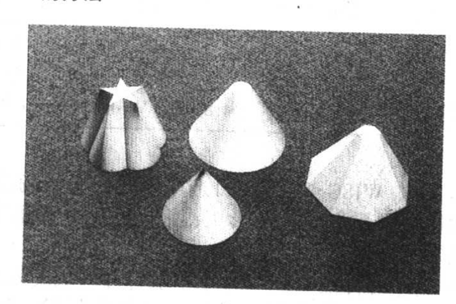


图 3.2-75 采用锥度切割装置加工的上下异形工件

为了实现在任何斜度位置上均有良好的冲液状态和自动穿丝，瑞士 AGIE 公司的机床上采用了四连杆式的锥度切割



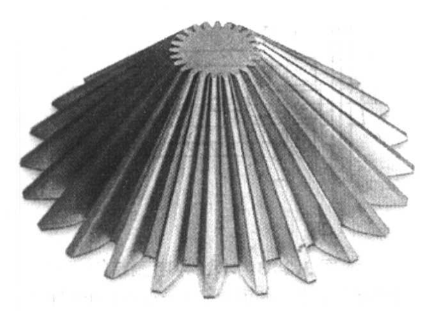


图 3.2-76 采用大锥度切割技术加工的大锥形齿轮

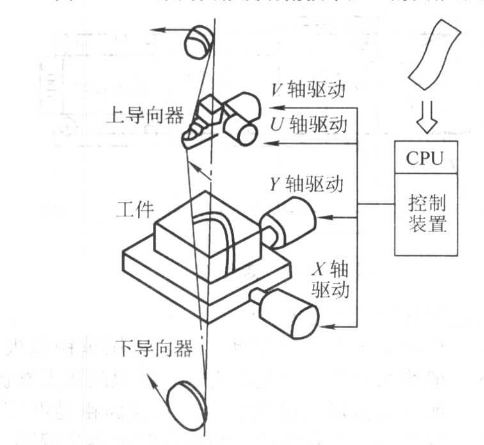


图 3.2-77 四轴联动锥度切割机构

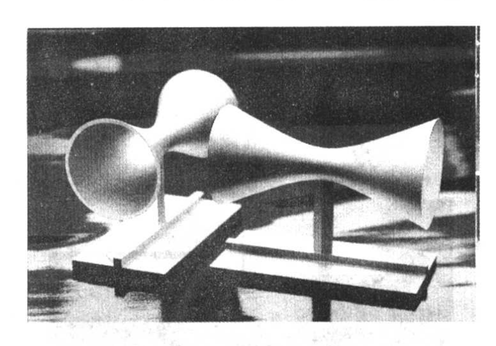


图 3.2-78 低速走丝线切割机床加工的带锥度的回转零件

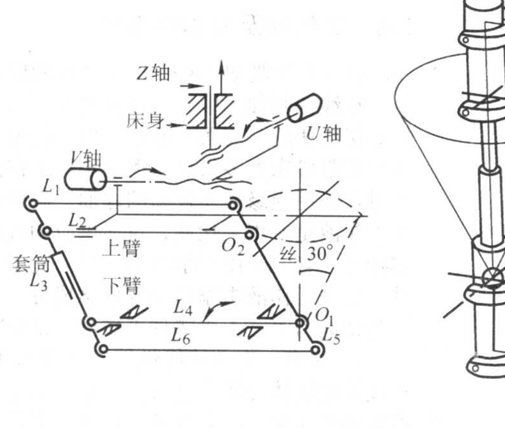
机构，见图 3.2-79。通过 U、V 轴电机驱动四连杆机构（$L_2-L_3-L_4-$电极丝）实现锥度切割；冲液的上下喷嘴设置在连杆 L_1 和 L_5 上，这样 $L_2-L_3-L_1-L_5$ 和 $L_2-L_3-L_4-L_5$ 又构成两个联动的四连杆机构实现同轴冲液。当把丝架上下臂的两个导向器设在球心 O_1 和 O_2 上时，该机构在锥度切割时，不存在原理上的误差。

2.4 电火花线切割机的自动穿丝系统

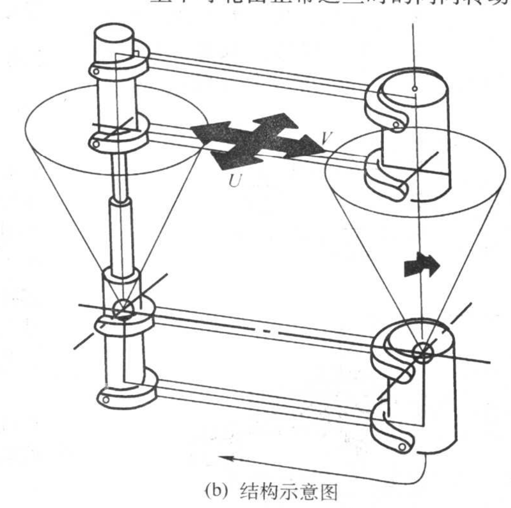
目前高速走丝线切割不具备自动穿丝功能。这里介绍低速走丝线切割机床上所采用的断丝及穿丝方法。

图 3.2-80 所示为绝大多数低速走丝线切割机床上所采用的断丝及穿丝方法。

上下导轮由正常运丝时的同向转动变成反向转动，并且



(a) 工作原理图



(b) 结构示意图

图 3.2-79 锥度切割四连杆原理示意图

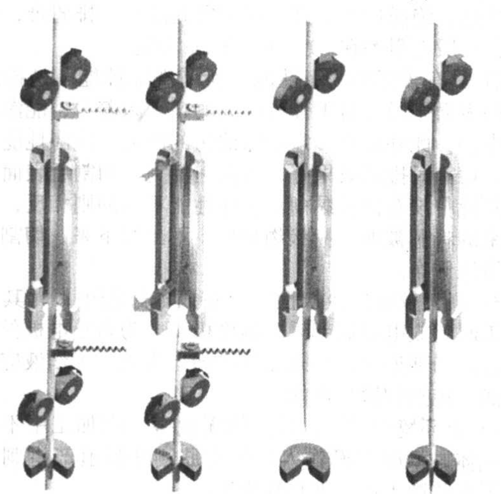


图 3.2-80 低速走丝线切割机床断丝及穿丝示意图

上导轮的转动使电极丝有向上运动的趋势，而下导轮则使电极丝有向下运动的趋势，同时在电极丝的两端通上电流，局部加热电极丝。在这两种作用下，电极丝融化并被拉断。由于是在融化后被拉断的，因此在断口处就自然形成了一个尖角，这将有助于下一步自动穿丝功能的完成。此后机床通过试探找丝的方法最终确定孔的位置，并利用这个尖角，将电极丝穿入工件上的孔及下导丝孔。整个过程相当迅速，目前可在 10 s 内完成一次断丝及穿孔。

图 3.2-81 所示为低速走丝线切割机床上的导丝、断丝、穿丝机构。

2.5 进电方式

(1) 高速走丝机床的进电方式

脉冲进电及变频取样通常有储丝筒进电方式、丝架进电方式和挡丝块进电方式。

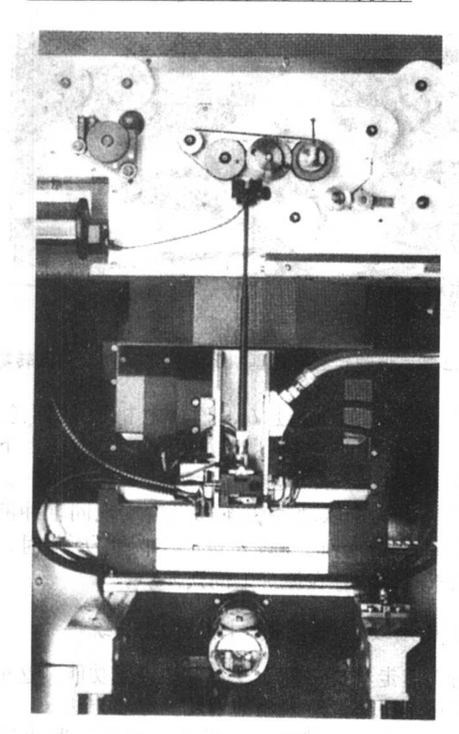
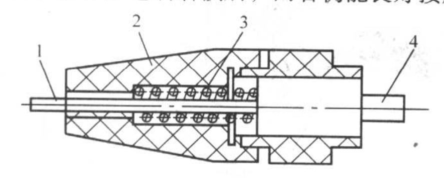


图 3.2-81　具有自动穿丝功能的导丝机构

1）储丝筒进电方式　储丝筒进电是通过储丝筒中心轴一端的石墨电刷实现的（见图 3.2-82）。脉冲电源负极与石墨电刷相接，由弹簧保证石墨电刷与轴端紧密接触，且中心轴可旋转，使石墨电刷磨损后，两者仍能良好接触。



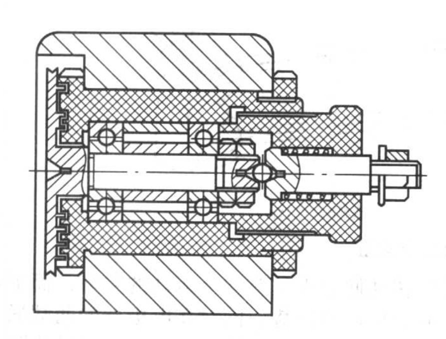


图 3.2-82　储丝筒、导轮（直接）进电机构
1—进电导线；2—绝缘体；3—弹簧；4—石墨电刷

2）丝架进电方式　丝架进电一般有导轮直接进电和导电柱进电两种形式。

① 导轮直接进电方式　此方法（见图 3.2-82）有利于减少脉冲电源的能量损失，并减少外界干扰。为减少导轮轴与进电部位的摩擦力矩，可采用水银导电壶结构（见图 3.2-83）。为防止水银对导针的腐蚀，导针选用不锈钢制造，水银壶采用有机玻璃材料。

② 导电柱进电方式　此种进行电方式的导电柱一般用硬质合金制成，固定在丝架的上、下臂处靠近导轮的部位，通过其与电极丝的接触进电（见图 3.2-84）。此种进电方式的缺点是，由于放电腐蚀，导电柱会产生沟槽，因此，应不断适当地调整导电柱与电极丝的接触位置，避免卡断电极丝。

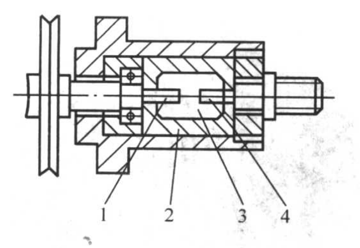


图 3.2-83　水银导电壶结构
1—导针；2—水银壶；3—水银；4—导针

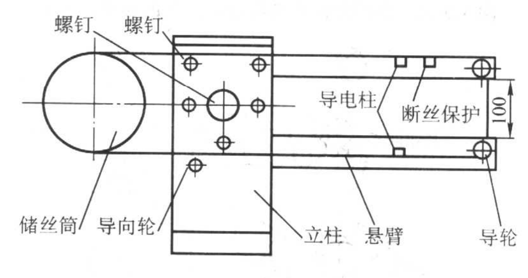


图 3.2-84　走丝架

（2）低速走丝机床的进电方式

低速走丝机床由于走丝速度低，加之采用黄铜电极丝，故进电方式一般均采用导电块进电方式。类似高速走丝机床的导电柱，一般为长方形的硬质合金，其表面粗糙度较好，通常为镜面。安装时可左右位移，当磨损时可逐步偏移，改变接触位置，从而可多次充分利用。

2.6　工作液及其循环系统

（1）线切割加工对工作液的性能要求

在线切割加工中，工作液对加工工艺指标的影响很大，如对切割速度、表面粗糙度、加工精度等都有影响。低速走丝线切割机床大多采用去离子水作工作液，只有在特殊精加工时才采用绝缘性能较高的煤油。高速走丝线切割机床使用的工作液是专用乳化液，目前供应的乳化液有许多种，各有其特点。有的适用于精加工，有的适于大厚度切割，也有的是在原来工作液中添加某些化学成分来提高其切割速度或增加防锈能力等。不管哪种工作液，都应具有下列性能。

1）具有一定的绝缘性能　火花放电必须在具有一定绝缘性能的液体介质中进行。工作液的绝缘性能可使击穿后的放电通道压缩，局限在较小的通道半径内火花放电，形成瞬时、局部高温融化、气化金属。放电结束后又迅速恢复放电间隙成为绝缘状态。绝缘性能太低，将产生电解而难于形成火花放电；绝缘性能太高，则放电间隙小，排屑难，切割速度低。一般电阻率在 $10^3 \sim 10^4\ \Omega\cdot cm$ 为宜。

2）具有较好的洗涤性能　所谓洗涤性能，是指液体有较小的表面张力，对工件有较大的亲和附着力，能渗透进入窄缝中去，此外还有一定去除油污的能力。洗涤性能好的工作液，切割时排屑效果好，切割速度高，切割后表面光亮清洁，割缝中没有油污黏糊。洗涤性能不好的则相反，有时切割下来的料芯被油污糊状物粘住，不易取下来，切割表面也不易清洗干净。

3）具有较好的冷却性能　在放电过程中，尤其是大电流加工时，放电点局部瞬时温度极高。为防止电极丝烧断和工件表面局部退火，必须充分冷却。为此，工作液应有较好的吸热、传热和散热性能。

4）对环境无污染，对人体无危害　在加工中不应产生有害气体，不应对操作人员的皮肤、呼吸道产生刺激等反应，不应锈蚀工件、夹具和机床。

此外，乳化液工作液还应具有配制方便、使用寿命长、



乳化充分、冲制后不能油水分离、储存时间较长及不应有沉淀或变质现象等特点。

由于线切割切缝很窄，顺利排除电蚀产物是极为重要的问题，因此工作液的循环与过滤装置是线切割加工不可缺少的部分。其作用是充分地、连续地向加工区供给清洁的工作液，及时从加工区域中排出电蚀产物，对电极丝和工件进行冷却，以保持脉冲放电过程能稳定而顺利地进行。

（2）高速走丝机床的工作液系统

一般线切割机床的工作液系统包括工作液箱、工作液泵、流量控制阀、进液管、回液管及过滤网罩等，如图3.2-85所示。

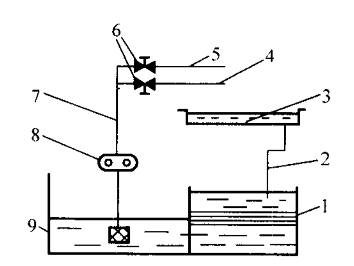


图3.2-85 线切割机床工作液系统

1—过滤器；2—回液管；3—工作台；4—下丝臂进液管；5—上丝臂进液管；6—流量控制阀；7—进液管；8—工作液泵；9—工作液箱

1）工作液过滤装置　如图3.2-86所示，用过的工作液经管道流到漏斗5，再经磁钢2、泡沫塑料3、纱布袋1流入水池中。这时基本上已将电蚀物过滤掉，再流经二块隔墙4，铜网布6，磁钢2，工作液得到过滤。此种过滤装置不需特殊设备，方法简单，可靠实用，设备费用低。也有采用低芯过滤的。

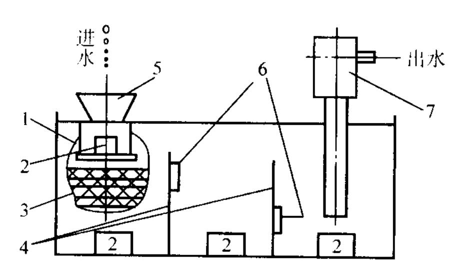


图3.2-86 工作液过滤图

1—纱布袋；2—磁钢；3—泡沫塑料；4—隔墙；5—漏斗；6—铜网布；7—工作液泵

此外，必须注意：水箱内壁不能涂漆，要作镀锌处理。工作液的黏度要小些，否则泡沫塑料会堵塞，水泵的进水口要装铜丝网。

坐标工作台的回水系统装有射流吸水装置，如图3.2-87所示。在进水管中装一个分流，流进回水管，使回水管具有一定的流速，造成负压，台面的工作液在大气压下畅通流入管而不外溢。

2）工作液喷嘴结构　工作液供到工件上一般是采用从电极丝四周进液的方法，其结构比较复杂。当然也可将工作液用喷嘴直接冲到工件与电极丝间（见图3.2-88）。乳化液经配水板直接冲击穿过喷嘴中心的钼丝。由于液流实际上是不稳定的，因此液流对钼丝直接产生一个不规则振源，当线架跨距160 mm左右时这个振源对工件精度和表面粗糙度的影响较小。随着线架的增高，对加工工件的精度和表面粗糙度的影响随线架增高而明显增大。为克服上述缺点，可以改进为如图3.2-89所示，在实际应用中收到良好效果。

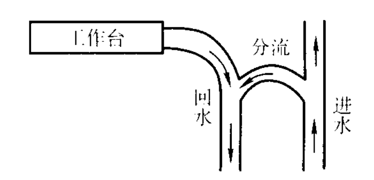


图3.2-87 射流吸水装置示意图泵

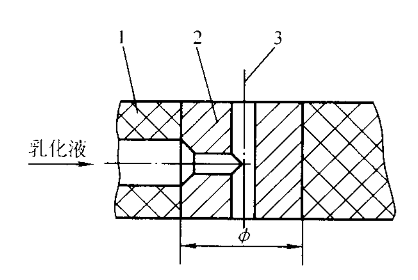


图3.2-88 喷嘴

1—配水板；2—喷嘴；3—钼丝

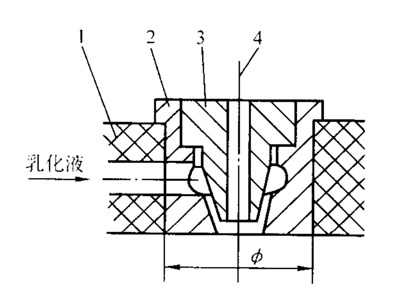


图3.2-89 环形喷嘴

1—配水板；2—嘴座；3—导液嘴；4—钼丝

喷嘴由导液嘴3和嘴座2组成，导液嘴和嘴座的配合采用静配合，装配时先将嘴座在200℃机油中加温后与导液嘴配合。由图示可知，乳化液经配水板1进入嘴座环形缓冲腔，由导液嘴的隔离改为向钼丝中心喷射环形液流。

（3）低速走丝机床的工作液系统

低速走丝电火花线切割加工利用水作工作液，使用前要除去水中的离子，称之为去离子水。为此，工作液循环装置要用离子交换树脂，以使工作液电阻保持一定。通常，在加工中使用的电阻值为$5\times10^4\sim7.5\times10^4\Omega\cdot cm$。在需要精密加工的情况下，也有工作液的恒温控制装置。过滤装置采用能滤过2 μm以上粒子的纸过滤器。

1）工作液箱　工作液箱（见图3.2-90）是用于向电极间（电极丝-加工物间）供应工作液的装置。贮存工作液的工作液箱由用于过滤工作液的过滤器箱、控制水的阻抗比的水质计、净水器等组成。

2）管道系统　低速走丝线切割机床管道系统如图3.2-91所示。

近年来有些采用浸泡式供液方法，见图3.2-92。由于被加工工件浸没在工作液中，因此对加工精度及加工的稳定性有一定的好处。

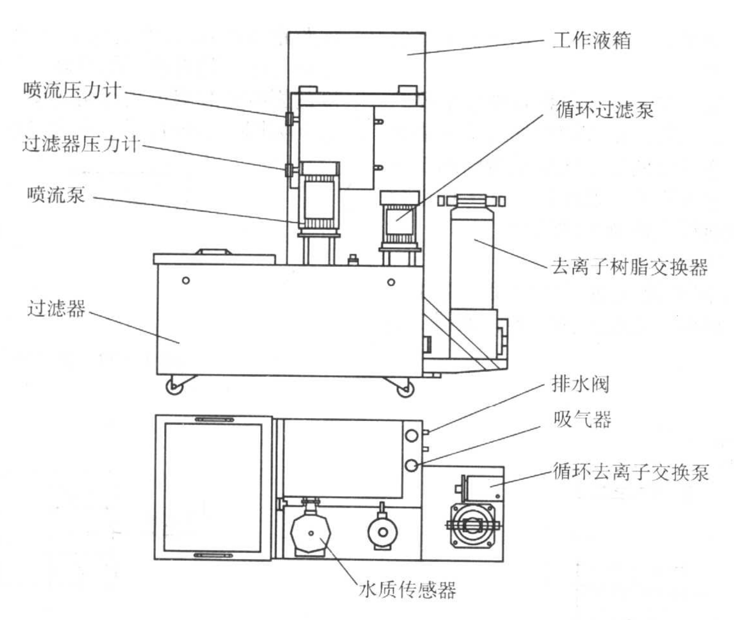


图 3.2-90 工作液箱组成图

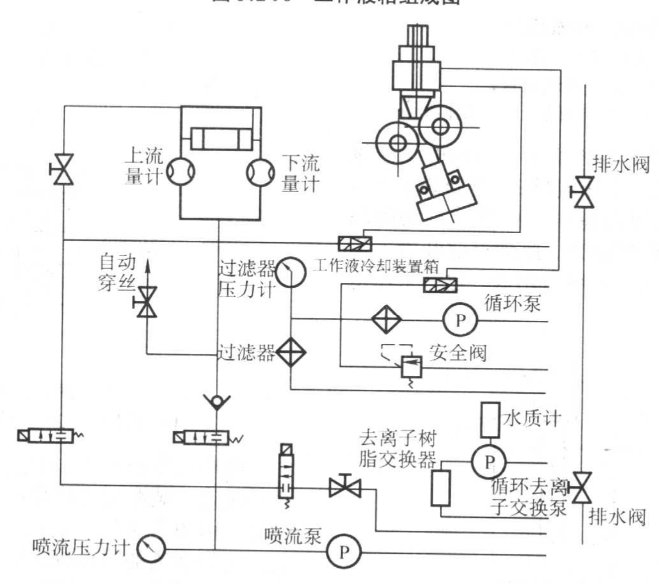


图 3.2-91 低速走丝线切割机床管道系统图

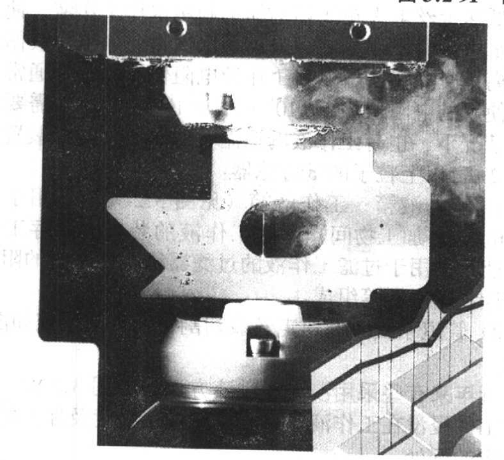


图 3.2-92 采用浸泡式供液加工的低速走丝线切割机床

3 脉冲电源

电火花线切割脉冲电源俗称高频电源，是数控电火花线切割机床的三大组成部分之一，它的性能优劣直接影响到线切割加工的工艺指标。

3.1 基本要求及组成

(1) 要求

电火花线切割加工属于中、精加工，尤其高速走丝线切割机床往往采用精规准将工件一次加工成形。因此，对加工精度、表面光洁度和切割速度等工艺指标有较高的要求。为了满足电火花线切割加工条件和工艺指标的要求，电火花线切割脉冲电源应满足下列要求。

1) 脉冲峰值电流要尽量高一些 在实际加工中，由于加工精度和电极丝运转张力的要求，电极丝的直径不宜太粗，一般电极丝直径在 0.08～0.35 mm 范围。WEDM-HS 受电极丝直径的限制，加上钼丝的电阻率较大，它所允许的放电峰值电流也就受到限制。与此相反，由于工件具有一定的厚度，欲维持稳定加工，放电脉冲电流又不能太小，否则加工将不易稳定进行或者根本无法加工。故 WEDM-HS 的脉冲峰值电流一般在 10～60 A 范围内变化。低速走丝的线切割加工（WEDM-LS）则与高速走丝的情况不同，电极丝采用铜



丝而电阻率低，脉冲峰值电流目前最大达到1 000 A以上。

2）脉冲宽度要窄　在电火花线切割加工中，欲获得较高的加工精度和表面光洁度，应使每次脉冲放电在工件上产生的放电凹坑要适当。这就要控制单个脉冲能量。当根据加工条件选定脉冲峰值电流后，可尽量减少脉冲宽度。脉冲宽度越窄，即放电时间越短，放电所产生的热就越来不及传导扩散，而被局限在工件和电极丝间很小的范围，一方面热传导损耗小，能量利用率提高了，更重要的是在工件上形成的放电凹坑不但小，而且也不存在烧伤现象。同时放电凹坑分散重叠较好，表面光滑平整，使放电表面凸凹不平度小，从而可以得到较高的加工精度和表面光洁度。

然而，线切割脉冲电源的单个脉冲能量又不能太小，否则将会使加工速度大大下降，或者加工根本无法进行。这样，脉冲能量就要控制在一定范围内。在实际加工中，WEDM-HS电源脉冲宽度约在1～80 μs范围内，WEDM-LS电源脉冲宽度约在0.1～80 μs范围内。

3）脉冲重复频率要尽量高　脉冲宽度窄，放电能量小，虽然有利于提高加工精度和表面光洁度，但是会使切割速度大大降低，为了兼顾这几项工艺指标，应尽量提高脉冲频率，即缩短脉冲间隔，增大单位时间内的放电次数。这样，既能获得较好的表面光洁度，又能得到较高的切割速度。

必须指出，脉冲间隔太短，会使消电离过程不充分，造成电弧放电并引起烧丝、断丝。因此，脉冲间隔又不能太短，只能在维持脉冲放电的前提下，尽量缩短这个时间。

一般情况下，WEDM-HS线切割加工的脉冲重复频率约在5～500 kHz范围内。WEDM-LS线切割加工的脉冲重复频率约在10～1 000 kHz范围内。

4）有利于减少电极丝损耗　在高速走丝线切割加工中，电极丝往复使用，如果它出现损耗会直接影响加工精度，损耗较大时还会增大断丝的概率。因此，线切割脉冲电源应具有使电极丝低损耗性能，以便能保证一定的加工精度和维持长时间的稳定加工。有的电源加工时电极丝的损耗较大，在一般加工条件下，加工10 000 mm^2面积时，电极丝丝径方向损耗可达0.01 mm之多。这样连续切割了10 000 mm^2的面积后，由于直径变化引起切缝变化，将造成明显的加工误差。电极丝损耗小的脉冲电源，切割50 000 mm^2面积时，电极丝丝径损耗小于0.01 mm，这时损耗对加工精度的影响就很小了。因此，在高速走丝线切割中，电极丝损耗应尽量小，电极丝损耗大小是电源性能好坏的重要标志之一。但在WEDM-LS线切割加工中，由于电极丝一次使用，其损耗对加工精度的影响就不太明显。

5）参数调节方便，适应性强　在线切割加工中，由于工件材料是多种多样的和厚度是经常变化的，加工形状与要求也各不相同，所以脉冲电源应能适应各种变化的条件，即在不同材料、不同厚度、不同形状与不同精度、粗糙度要求的加工时，都能获得满意的加工结果。为此，需要电源输出的脉冲电参数可以方便地调节，以便适应各种情况加工。

6）考虑低速走丝电火花线切割脉冲电源的特点　由于低速走丝电火花线切割采用去离子水作为加工介质，其脉冲电源的设计与高速走丝机脉冲电源比较，它的特点是要求具有适当的加工电压，大峰值电流，合适的脉宽（一般是窄脉宽）和停歇时间，极性都是正极性（即电极丝—阴极；被加工物—阳极）。为满足这些条件所采用的精微加工放电电路，通常附有精微加工电路。另外，并需设计各种加工自动控制，主要是控制脉冲电源的参数和加工进给。这样，加工过程稳定，不容易断丝，提高了加工精度和切割速度。具体参见表3.2-7。

（2）组成和种类

电火花线切割脉冲电源形式种类很多，按放电脉冲波形划分有方波（矩形波）、方波加梳形波、馒头波、前阶梯波、锯齿波、分组脉冲波等电源，如图3.2-93所示。

表3.2-7　低速走丝机脉冲电源的特点

特　点	说　明
放电峰值电流大（粗加工时达80～300 A），时间短（几微秒），极性：工件接正极，电极丝接负极	1）在不易断丝条件下提高切割速度，在粗加工时广泛采用 2）这种参数会使电极丝损耗加大，但对一次使用不必考虑
电源波形种类和电参数选择挡次多	符合不同加工对象的多次切割和参数优化的需要，优化的主要目标是在保证加工精度的条件下，提高切割速度
有时在粗加工时外加静电场和弱功率电压	补偿电力，改善因电极丝滞后而出现的塌角现象
有时能使间隙电压的平均值等于零	在水工作液情况下，电源的直流分量产生的电解作用易在加工面生成软化层，采用平均电压为零的电路可抑制这种现象
精加工时广泛采用亚微秒级脉冲	使单个脉冲能量只有几个微焦，这样可显著改善加工表面质量，使 $R_a=0.2$～0.5 μm（甚至 $R_y=0.3$ μm），工作表面变质层及显微裂纹小于0.2 μm
脉冲电源与计算机数控系统有密切联系	1）脉冲电源参数由1～2个微处理机控制 2）控制系统内设置工艺参数库，便于调用修改 3）依靠不同的软件可扩充适应控制功能 4）常采用光纤抗干扰技术
适应控制	1）加工中不断监视加工间隙状态，正确控制所产生的每一个放电能量，抑制加工间隙状态的变化，恒间隙控制是精密加工的必要条件 2）在切入阶段自动调整输入功率和进给速度 3）当切割厚度增大时，能自动调高切割功率和降低进给速度 4）二次切割和其他电极丝偏在切缝一边的场合，能自动适应变小的放电面积 5）在锥度切割时能自动控制电流的分配，以补偿上下面上不同的进给速度

目前广泛采用的电源是晶体管方波电源、晶体管控制的RC式电源和分组脉冲电源。

1）晶体管方波脉冲电源　晶体管方波脉冲电源是目前普遍使用的一种电源。电压波形如图 3.2-93 a 所示。电源电路形式较多，但原理基本相同。图 3.2-94 是电源组成的方框图。

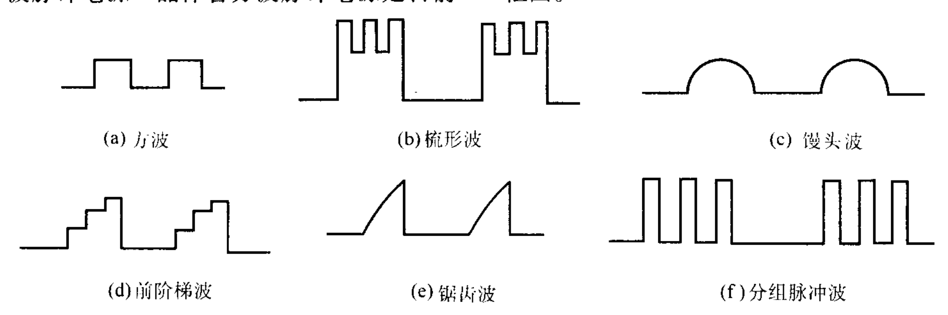


图 3.2-93　脉冲放电波形

由图 3.2-94 可知，晶体管方波脉冲电源大体由四部分组成：主振级，前置放大级，功率放大级和直流电源。

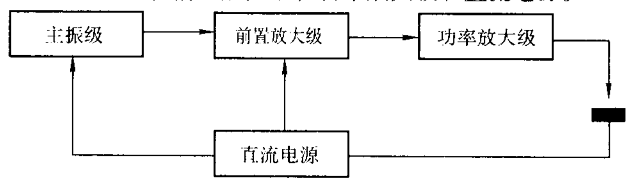


图 3.2-94　方波脉冲电源组成的方框图

主振级是脉冲电源的（主体）核心部分，由它给出所要求的脉冲波形和参数。一般情况下，主振级均采用自激多谐振荡器直接形成方波，该电路由两晶体管组成或四晶体管组成，也有采用晶振经分频后形成方波的。近年来，采用组件和集成块甚至单片机来产生波形的愈来愈多了，为数值脉冲电源的开发和应用奠定了基础。

前置放大级是把主振级信号放大，以推动功率放大级。其电路多采用脉冲反相器或射极输出电路。后者能起到良好的阻抗匹配作用，并得到适当的电流放大倍数，故优于前者，被较多采用。作为射极输出级，起耦合作用，它的输入阻抗高，输出阻抗低，介于功放与主振级之间，起到互不影响的作用，它的电压放大倍数为 < 1，但能将输入电流放大，即起到改变脉冲电流的作用，即如前述的阻抗匹配作用。

功率放大级是把前置放大级的脉冲信号进行功率放大，然后输出。功率放大级多采用反相器电路或射极输出电路。

这种电源电路的特点是：脉冲宽度和脉冲频率可调，制作简单、成本低。但只能用于一般精密加工。

2）方波加梳形波电源　电压波形如图 3.2-93 b 所示，这种电源在放电过程中可形成放电电流波动，加工效果比方波电源要好。由于下方波存在关不断现象，一次放电延续时间过长会引起烧丝，结构比方波复杂，而且成本高，用得很少。

3）馒头波电源　输出的电压波形如图 3.2-93 c 所示，这种脉冲的前沿上升缓慢，脉冲能量开始不集中，放电凹坑小，加工光洁度比方波的要好，而且电极丝损耗小，但加工效率低，仅用于微细加工比较合适，用得不多。

4）前阶梯波电源　前阶梯波电源可以在放电间隙输出阶梯状上升的电流脉冲波形，如图 3.2-93 d 所示。这种波形可以有效地减少电流变化率 $\Delta i/\Delta t$。一般是由几路起始时间顺序延时的方波在放电间隙叠加组合而成。它有助于减少电极丝损耗，延长电极丝使用寿命，还可以提高加工光洁度，俗称电极丝低损耗电源。但加工效率较低，用得也不太多。

5）锯齿波电源　锯齿波如图 3.2-93 e 所示，脉冲波形前沿幅度缓变，可以提高加工光洁度，但加工效率不高。锯齿波电源俗称电极丝的低损耗电源。由于其电路比较简单，成本低，用得较多。

6）分组脉冲电源　分组脉冲电源是高速走丝（WEDM-HS）和低速走丝（WEDM-LS）两种线切割机床使用效果比较好的电源，是一种有发展前途的电源。这种电源有分立元件式、集成电路式、数字式等几种，其波形如图 3.2-93 f 所示。分组脉冲电源原理方框图如图 3.2-95 所示。脉冲形成电路是由高频短脉冲发生器、低频分组脉冲发生器和门电路组成。高频短脉冲发生器是产生小脉冲宽度与小脉冲间隔的高频多谐振荡器；低频分组脉冲发生器是产生大脉冲宽度和大脉冲间隔的低频多谐振荡器，两个多谐振荡器输出的脉冲信号经过“与门”（或者“与非门”）后，就可以输出分组脉冲波形。这样的波形再经过脉冲放大和功率输出级，就能在放电间隙得到同样波形的电压脉冲。

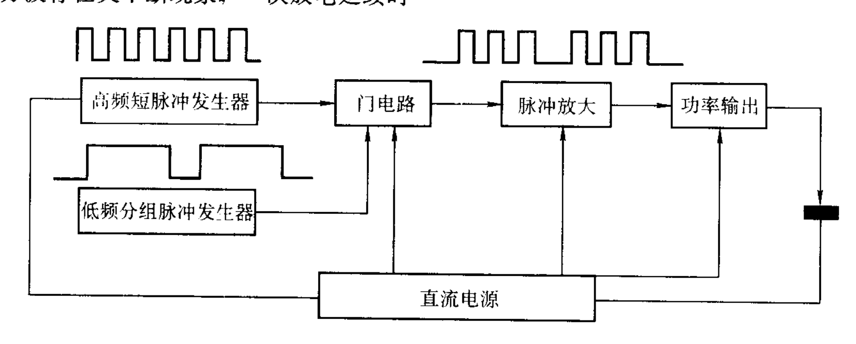


图 3.2-95　分组脉冲电源原理方框图

前面分析了峰值电流限制在一定范围内后，脉宽越窄，单个脉冲能量就越小，得到的光洁度就越高，但单个脉冲蚀除量就越低。为了保证切割速度，必须尽可能地提高脉冲重复率。不过脉冲间隔压缩到一定程度后，会使消电离不足而引起加工不稳定现象。这样，提高加工光洁度和提高切割速度就出现了矛盾。分组脉冲波正是为了解决这一矛盾而提出

的一种比较有效的电源形式：每组高频短脉冲之间有一个稍长的停歇时间，在间隙内可充分消电离。这样高频短脉冲的频率可以提得很高，缓和了光洁度与切割速度的矛盾，二者都得到较好的兼顾；而且两极间有充分的消电离机会，保证了加工的稳定进行。

现在从放电理论来分析一下这种电源。在一个波形的加工过程中，放电次序（或许）是这样的：首先在放电最佳点处进行放电腐蚀，从而形成第一个凹坑，下一个脉冲紧接着便在第一个凹坑的周围继续加工，把凸出的部分加工掉，而形成一个平凹坑。当然这种排列组合是十分复杂的，从波形上来看，一个波形的加工过程中，有击穿延时、正常加工、微电弧、微短路等各种复杂的现象。由于多通道电火花加工，放电点是多点的、多点放电存在于一次加工中。

图 3.2-96 是单个脉冲加工过程中的波形图。分组脉冲的特点就是把一个宽脉冲分解成多个窄脉冲，但这时的脉冲已经发生了质的变化。关键是一个“窄”字，又窄又是分组的，问题的实质在于窄的脉冲，又是多个分组的窄脉冲。这样就提高了线切割的加工精度，降低了表面粗糙度。当然处理不好会造成不稳定。这时宜采用共轴式冷却系统和优质乳化油。

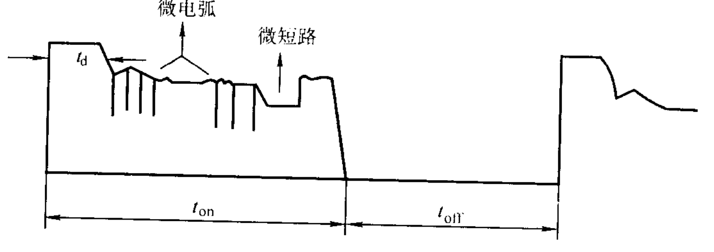


图 3.2-96　分组脉冲加工中的波形图

t_d—击穿延时；t_{on}—脉冲宽度；t_{off}—脉冲间隔（不加工）

高频分组窄脉冲电源有助于提高线切割的加工精度和加工表面质量，还有助于降低电极丝损耗。

7）晶体管控制 *RC* 微精加工电源　图 3.2-97 是晶体管控制 *RC* 微精加工电源的原理图。它实际上是在晶体管方波脉冲电源的基础上，增添了一个 *RC* 电路。放电间隙的能量与 *RC* 的数值有关，改变 *RC* 的时间常数和方波功率输出级的脉冲宽度，可以方便地控制单个脉冲能量。这给电火花线切割的精加工带来很大的灵活性。目前在微精加工和 WEDM-LS 线切割机中用这种电源较多。

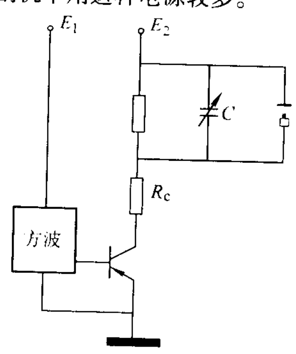


图 3.2-97　晶体管控制 *RC* 微精加工电源原理图

8）大功率场效应管式　采用晶体管作开关元件时，脉冲宽度很难压缩到 1 μs 以下。因此有采用大功率场效应管来替代晶体管的趋势，这种元件的开关速度极快。当驱动电路合适时，开通或截止时间为 10 ~ 100 ns，所以容易达到 1 μs 以下的脉冲宽度。

9）晶体管-电容-晶体管式（见图 3.2-98）　这种电路与晶体管控制的电容器放电式的差别在于增加了另一个开关元件 BG_2，它可以是晶体管或场效应管，由放电控制电路控制其通断，当电容器 C 充电完成后，BG_2 导通而开始放电，由于导通时间一定，所以可保持恒定的电流峰值和脉冲宽度，在 C 充电时 BG_2 截止，有利于间隙消电离。这样可提高加工稳定性。

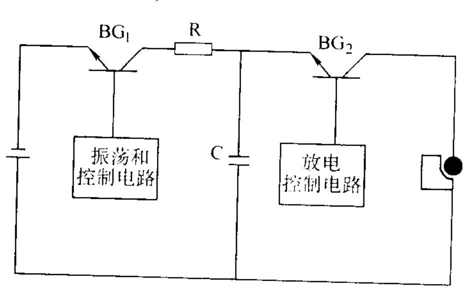


图 3.2-98　晶体管－电容－晶体管式脉冲电源

10）无电解作用的脉冲电源（见图 3.2-99）　该电路用隔离变压器将直流电源与加工间隙隔离，可实现无电解作用的线切割加工，否则在水中进行电火花线切割加工时，因电解作用会形成一定厚度（7 ~ 20 μm）的软化层，它会使模具使用寿命大为降低，而对硬质合金所产生的疏松层更为严重。

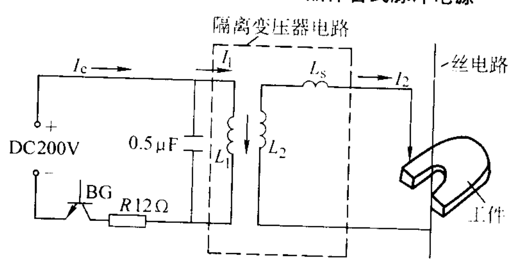


图 3.2-99　无电解作用的脉冲电源

11）高频交流电源　为获得极精细的加工表面，必须采用微小的放电能量，一般直流脉冲电源很难获得 1 μJ 以下的微能脉冲。采用交流电源可使连续放电时间不超过其半周期，在间隙电容和电路电感产生谐振时，由间隙共振产生的静电场引起线电极电子发射，在低电容高频（10 MHz）条件下可得到 R_y 低于 0.2 μm 的低粗糙度表面。

12）双回路与多回路脉冲电源　双回路或多回路脉冲电源的电路原理同单回路脉冲电源一样，它可以由两个或多个单回路脉冲电源组成，也可以由一个脉冲电源分割成两路或多路输出来实现。

在电火花线切割加工中，还有采用双回路脉冲电源来加工的，如图 3.2-100 所示。这样在一般的加工表面粗糙度要求情况下，能大大缩短加工时间。

同样多头线架线切割机床也可采用多回路电源，它可以同时加工多个相同的工件，如图 3.2-101 所示。

也可以一次加工一个工件上的多个相同的图形。如图 3.2-102 所示。这两种加工方式不但能在一定表面粗糙度下大幅度提高加工速度，而且有助于提高工件的加工重复精度。

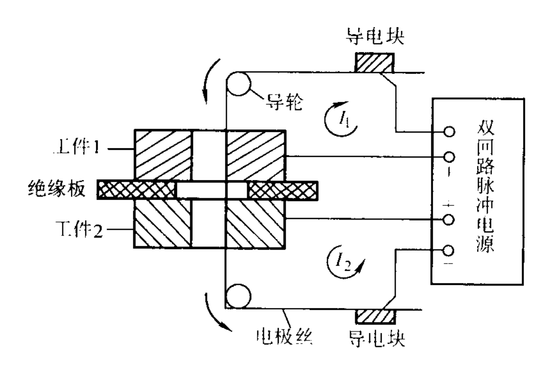


图 3.2-100　双回路脉冲电源加工示意图

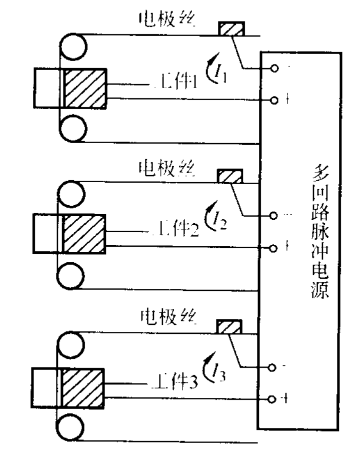


图 3.2-101　多回路脉冲电源加工多个工件

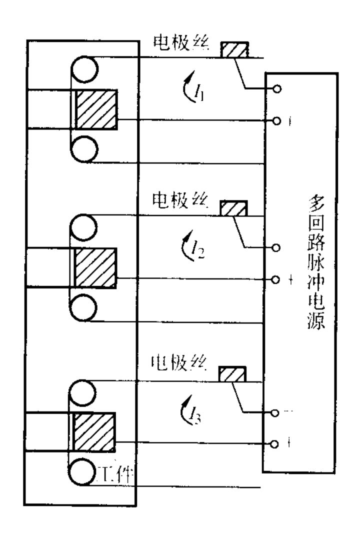


图 3.2-102　多回路脉冲电源加工一个工件

3.2　高速走丝脉冲电源电路分析

脉冲电源电路的生产厂家不同，品种很多，这里只对其中几种略加分析。

（1）晶体管多谐振荡式脉冲电源

晶体管多谐振荡式脉冲电源电路（见图 3.2-103）是由晶体管多谐振荡式脉冲发生器发出的脉冲，经推动级 VT_3、VT_4、VT_5 放大后，推动功放管 VT_6 而工作。

推动级是由三极管 VT_3 ~ VT_5、二极管 VD_7 ~ VD_{11} 和电阻 R_7 ~ R_{11} 组成的射极输出脉冲放大器。其中 VT_3 的基极电阻

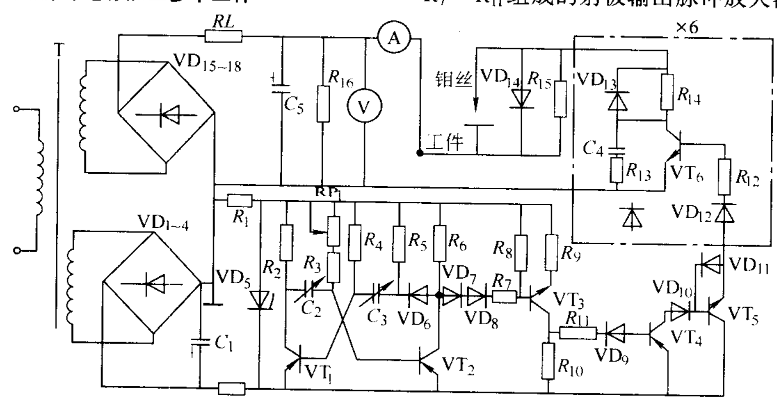


图 3.2-103　晶体管多谐振荡式脉冲电源电路

R_7 较大，以减轻多谐振荡器的负载，使之稳定可靠地振荡；VT_4 采用 PNP 型开关三极管，可使整个放大级电路开关时间一致；VT_3 ~ VT_5 基极回路中的二极管，是利用它本身的正向压降来抵消前一级三极管漏电流的影响，从而使各管截止更可靠。

功放采用 6 组反相器电路并联运行，高频大功率三极管 VT_6 工作在开关状态，基极串有电阻 R_{12} 用以调整注入电流的大小，基极串联的二极管 VD_{12} 除使 VT_6 可靠截止外，还能在 VT_6 损坏后保护前面的元件不被功放级较高电压击穿；集电极串联限流电阻 R_{14}，可以保护 VT_6 在放电间隙短路时不被烧毁，R_{14} 上并联的二极管 VD_{13} 用以消除集电极电阻上较高的感应电势，它与 VT_6 集－射结连接的 R_{13}、C_4 阻容吸收回路，都是用来保护 VT_6 的，以避免截止时的过压击穿。

间隙并联的电阻 R_{15} 用于空载时观察波形，二极管 VD_{14} 用来消除两极输送线电感的影响。

（2）单结晶体管脉冲发生式脉冲电源

单结晶体管脉冲发生式脉冲电源电路（见图 3.2-104）是由单结晶体管 VT 发出的锯齿波脉冲，经 VD_1 和 VD_2 组成的单稳态触发器整形后所得的矩形波，经 VD_3、VD_4 和 VD_5 组成的推动级放大后推动 VD_6 功放管工作，以提供钼丝和工件之间电火花放电的能量。

该脉冲电源的直流电源采用三相桥式整流电路。其特点是内阻低，所输出的直流电压波形脉动小，可以只用小的滤波电容即可获得比较平稳的直流电源，以供应工件和钼丝之间脉冲火花放电的能量。

（3）555 脉冲发生器

555 脉冲发生器及场效应功放管脉冲电源见图 3.2-105。

为了满足不同表面粗糙度的加工需要，要求该电源既能提供矩形波，又能提供分组波。一般情况下使用矩形波加工，矩形波脉冲电源对提高切割速度和改善表面粗糙度这两项工艺指标是互相矛盾的，即当提高切割速度时，表面粗糙度变差。若要求获得较好的表面粗糙度，必须采用较小的脉冲宽度，使得切割速度下降很多。而高频分组波在一定程度



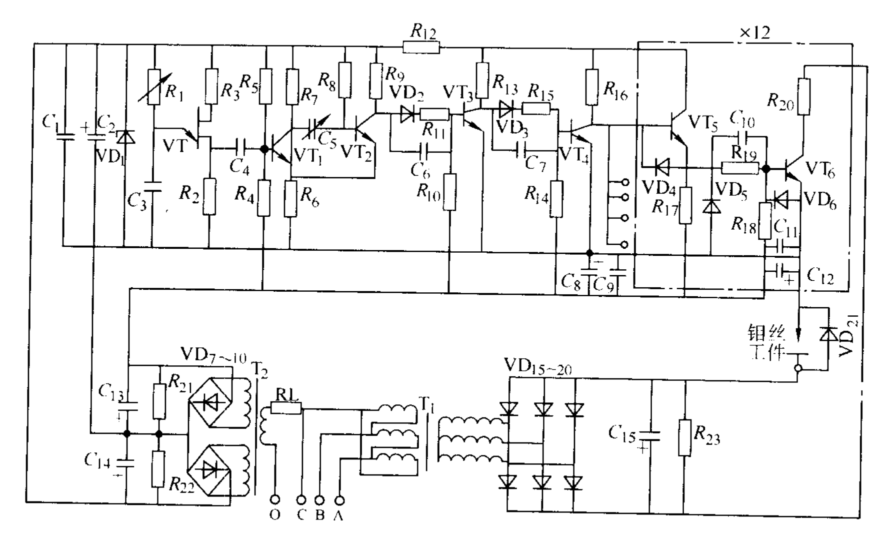


图 3.2-104　单结晶体管脉冲发生式脉冲电源电路

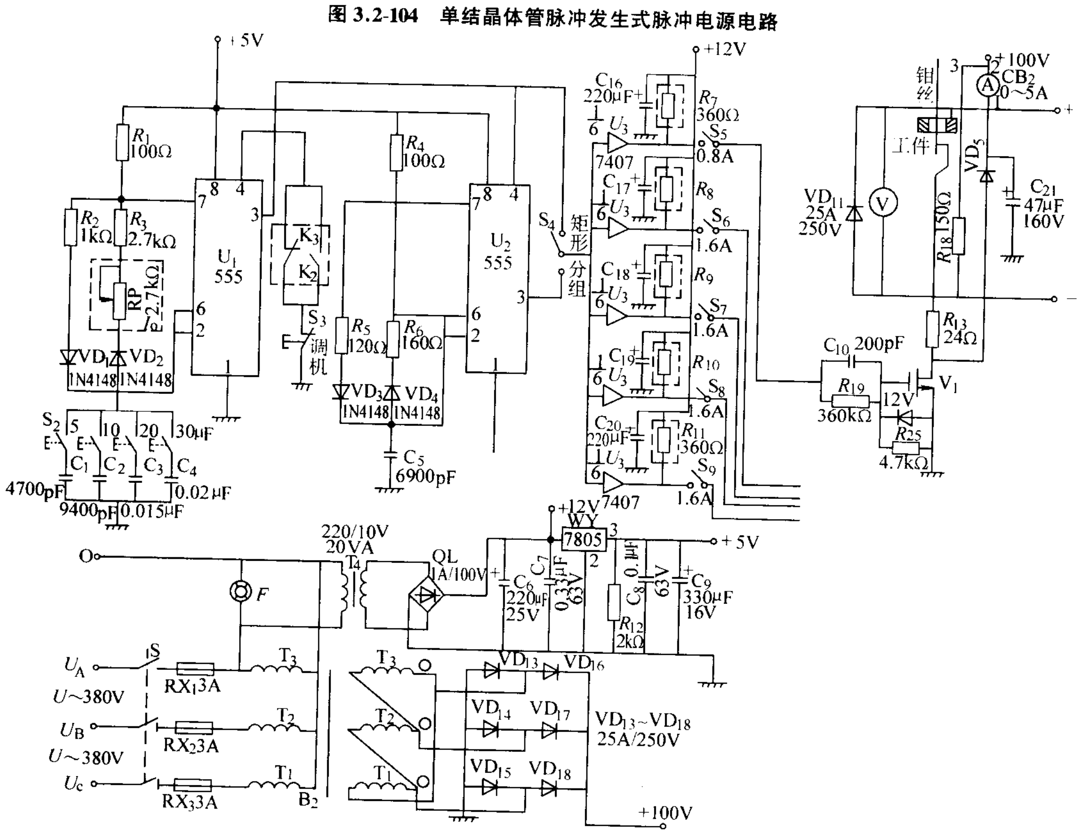


图 3.2-105　555 脉冲发生器及场效应功放管脉冲电源

上能解决这两者的矛盾（见图 3.2-106），它由窄的脉冲宽度 t_i'和较小的脉冲间隔 t_0'组成，由于每一个脉冲的放电能量小，使切割表面的表面粗糙度 R_a 值减小，但由于脉冲间隔 t_0'较小，对加工间隙消电离不利，所以在输出一组高频窄脉冲后经一个比较大的脉冲间隔 t_{off}，使加工间隙充分消电离后，再输入下一组高频脉冲，这样就形成了高频分组脉冲。

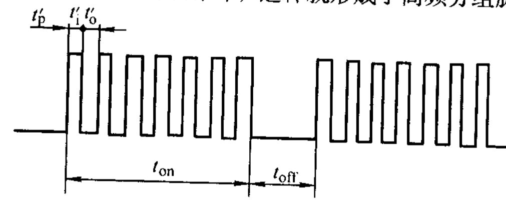


图 3.2-106　高频分组脉冲的开路电压波形

1）电路结构　脉冲发生器矩形脉冲和分组脉冲的生成见图 3.2-107。

脉冲发生器一般称主振级，它可分为两部分，以 555 芯片 U_1 等所组成的是矩形波脉冲发生器，以 555 芯片 U_2 等所组成的是高频分组波脉冲发生器。K_4 是二者的输出选择开关。

① 矩形波脉冲发生器

a）脉冲宽度 t_{on}调节选择　图 3.2-107 中电容由 C_1、C_2、C_3 和 C_4 组成，用琴键开关 S_2 来选择它们之间的并联组合，可获得 5～65 μs 的不同脉冲宽度 t_{on}，调节电位器 RP，可使脉冲间隔在脉冲宽度的 4～8 倍范围内平滑变化。

b）高频输出控制　当 555 芯片的 4 脚悬空时，3 脚有脉冲输出，当 4 脚接地时，3 脚停止输出脉冲。该处在脚 4 和地之间有常闭触头 K_3、常开触头 K_2 及调机按键 S_3，它们都是用以控制高频脉冲的输出通或断用的。



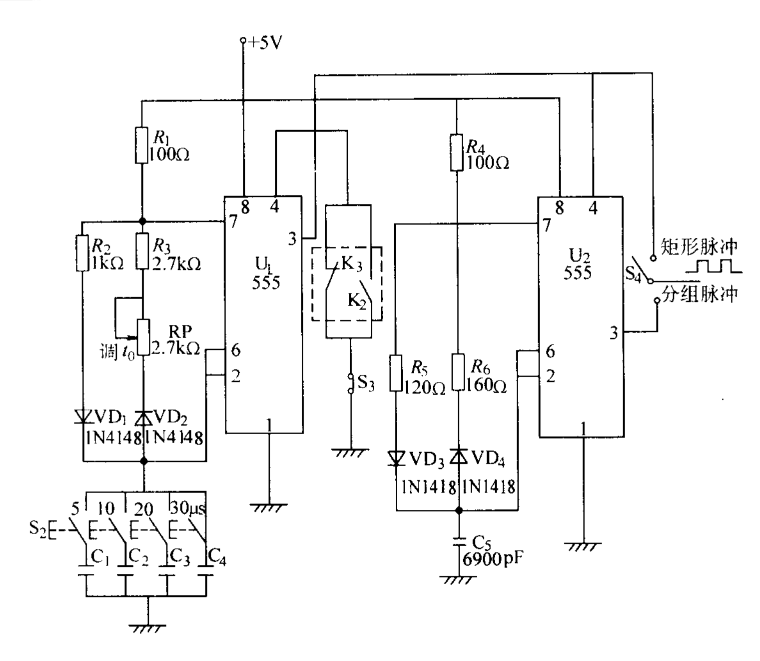


图 3.2-107 矩形波和分组波脉冲发生器

K_3 常闭触头是有程序、有高频，程序加工结束时自动断高频用的。当线切割控制器已输入的程序调出来加工时，即控制器处于有程序状态，此时控制器输出一个 +12 V 信号使高频继电器 K_3（图 3.2-107 中未画出）吸合，致使其常闭触点 K_3 断开，555 芯片的脚 4 悬空，故脚 3 输出脉冲，即有高频输出。当该工件的程序全部加工结束时，控制器输出 0 V 信号，使高频继电器 K_3 放开，该常闭触点 K_3 又恢复闭合状态，使脚 4 接地，脚 3 停止输出脉冲，即实现程序结束，自动切断高频。

K_2 常开触头用于储丝筒换向时自动切断高频。当走丝电动机换向时，在电动机换向线路中串入一个升压变压器（图 3.2-107 中未画出），把电动机换向时，在升压变压器中所产生的感应电势经整流滤波后所获得的直流电压，使走丝换向自动切断高频继电器 K_2 吸合，而使 K_2 触点闭合，使脚 4 接地，促使脚 3 停止脉冲输出，当走丝换完向之后，感应电势消失，K_2 恢复常开状态，脚 3 又有脉冲输出。

S_3 是调机用的按钮开关，当单独对高频电源进行调试或控制器中未调出程序时，需要输出高频，可以按 S_3 按钮，使 4 脚与地断开，3 脚就有高频输出。

② 高频分组脉冲发生器　555 芯片 U_2 用以产生分组脉冲的小脉冲宽度 t'_i 和小脉冲间隔 t'_0，各为 2.5 μs。U_2 的 4 脚由 U_1 的 3 脚所输出的矩形脉冲来控制，因此 U_2 的 3 脚输出分组脉冲波如图 3.2-106 所示，分组脉冲的大脉冲宽度（即一组分组脉冲的总宽度）等于矩形波的脉冲宽度 t_{on}，分组脉冲的脉冲大间隔等于矩形波脉冲的脉冲间隔 t_{off}。

③ 推动级　因功放管是场效应管，是电压驱动，故 555 脉冲发生器及场效应功放管脉冲电源的推动级很简单，由 7407 芯片来完成即可。它与前级之间用开关 S_4 可以分别选择矩形波或分组波，由 7407 分五路把脉冲信号传输至功放，每一路各由一个开关来控制，用开关 S_5 ~ S_9 可以灵活地选择参加切割时放电的功放管个数。

④ 功放级　功放分五路，每路一个大功率场效应管，在图 3.2-105 中只画出第一路，其余四路与该路相同，第一路功放管的限流电阻 R_{13} 为 24 Ω，故当第一路功放管导通时，其短路峰值电流为 i_m = 100 V/24 Ω = 4.16 A，其余四路的限流电阻分别只有 12 Ω，故每路功放管导通时，其短路峰值电流均为 i_m = 100 V/12 Ω = 8.3 A。当脉冲宽度：脉冲间隔 = 4:1时，第一路的短路（平均）电流为 i_m = 4.16/（4 + 1）A = 0.832 A，其余四路每路的短路电流 i_s = 8.3/（4 + 1）A = 1.66 A。可见用五个开关组合使用，可得到的短路电流为 0.832 ~ 7.472 A，以供作不同加工时选用。

⑤ 直流电源　直流电源共分为 +100 V、+12 V 和 +5 V。+100 V 为生成加工用脉冲波的直流电源，它由 U_A、U_B、U_C 三相交流电经降压、整流获得，即使不加滤波电容，也有比单相整流滤波后的波纹度小和电压特性硬等优点。+12 V为交流 220 V 经整流滤波而得，做推动级的电源，+12 V再经 7805 三端稳压块稳压和电容滤波后，获得电压比较稳定的 +5 V 直流电源，可用于 555 芯片作电源。

2）电路工作原理　单片机脉冲发生器及场效应功放管脉冲电源的工作原理如下。

高频脉冲由单片机发出，共分五路，每路驱动两个场效应功放管。脉冲宽度和脉冲间隔各分为 0 ~ F 挡，即 16 挡，其所对应的脉冲宽度 t_{on}或脉冲间隙 t_{off}为 3 ~ 48 μs，0 挡最小，F 挡最大。除了可以发出上述矩形脉冲之外，还可以发出分组脉冲，当脉冲宽度显示 P 挡与 H 挡时，有两种分组脉冲，P 挡小脉宽 t_i'为 6 μs，H 挡小脉宽 t'_i 为 3 μs。功放管调节的有效挡数为 1、2、3、4、5 共 5 挡，显示数乘 2 就是当时投入的功放管数。脉冲宽度、脉冲间隔和工作的功放管数，面板上均有显示，分别用按键作增减调节。高频输出由一对触点 K_1 和 K_2 控制，当线切割控制器处于有程序状态时，线切割控制器向脉冲电源提供 K_1、K_2 闭合状态，脉冲电源就输出脉冲；当控制器中的程序加工结束时，控制器将脉冲电源成为 K_1、K_2 断开状态，则脉冲电源停止输出脉冲。

3.3 低速走丝脉冲电源

一种脉冲电源的原理框图见图 3.2-108，该电路由放电间隙高低压检测控制电路、加工状态控制电路、主振级、前级放大器和功放级等组成。

图 3.2-109 是其电路原理，各组成部分如下。

1）检测电路由光电耦合管 BG_1 和 BG_2、晶体管 BG_3、BG_4、BG_5 及集成电路 BG_6（5G1555 时基电路）组成，指示灯 DX 指示加工状态（正常或异常）。

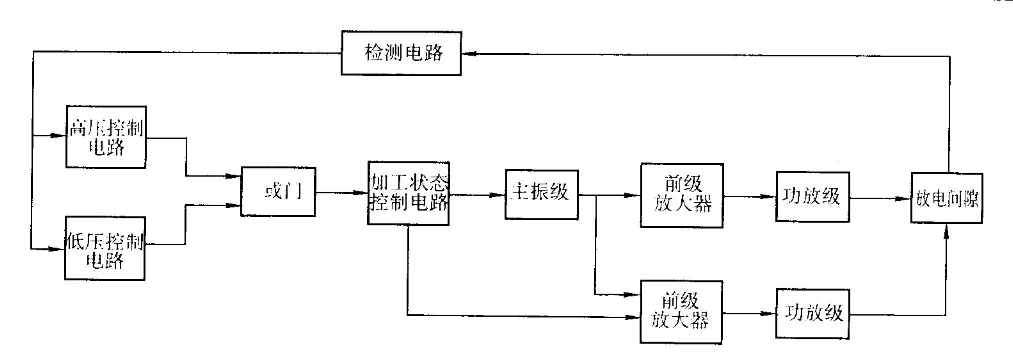


图 3.2-108　脉冲电源框图

图 3.2-109　脉冲电源原理图

2) 主振级由集成电路 BG_{12}、BG_{13} 和晶体管 BG_{14} 组成，脉宽由波段开关分挡调节，脉间由电位器 WR 进行无级调节。采用矩形波加工时开关 K_1 打开，从晶体管 BG_{17} 取出脉冲信号。

3) 分组脉冲信号由集成电路 BG_9 和 BG_{10} 组成的多谐振荡器，通过晶体管 BG_{16} 控制主振级而取得。

4) 前级放大器共两组，分别由晶体管 BG_{18}、BG_{19}、BG_{20}、BG_{21} 和晶体管 BG_{22}、BG_{23}、BG_{24}、BG_{25} 组成。

5) 功放级由 5 块功放板组成，并由两组前级放大器驱动。K_2、K_3、K_4 分别为功放板 1、2、3 的开关，用来选择加工电流的大小。功放板上的前置放大器采用低压 ±5 V 直流电源电压的晶体管跟随器输出电路，安全可靠，易于实现窄脉冲。功放一般分高低压两组。

6) 加工状态的控制利用从加工区检测到的电压信号，在正常加工状态下，集成电路 BG_5 的“3”端输出为高电位，主振级输出信号处于正常工作状态，在异常的短路或开路情况下，BG_6 的“3”端输出为低电位，系统控制电路迫使主振级和功放级改变脉冲电源的参数，以提高加工稳定性。

3.4　适应控制电源

自适应控制系统能通过对加工状态实时的分析和识别，自动调节寻找最佳参数，达到优化切割速度，提高加工效率和降低表面粗糙度，简化操作的目的。自适应控制方式见表 3.2-8。一种自适应控制脉冲电源框图见图 3.2-110，其组成及作用见表 3.2-9。



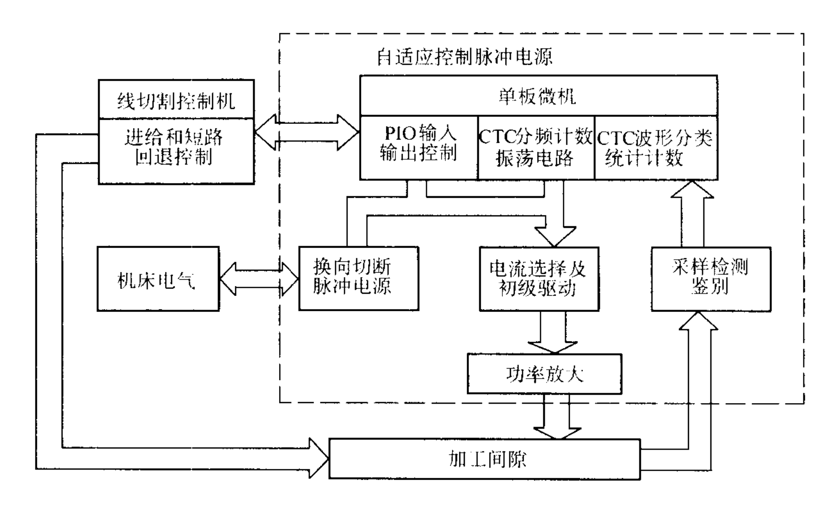


图 3.2-110 自适应控制脉冲电源框图

表 3.2-8 自适应控制方式

采样检测方法	控制方法	实现手段	被控参数
单参数间隙电压采样检测	在采样检测获得的信号与被控量之间建立一种近似的线性函数关系进行约束性的适应控制与自动调节	用运算放大器等元器件线路进行处理	只对进给速度实施调节控制
多参数（间隙电压、电流、工件厚度等）采样检测	把采样检测获得的信号区分成三种（开路、短路、火花放电）或五种（开路、短路、火花放电、电弧、延迟放电）基本脉冲状态。然后在脉冲分类统计单元实时地统计出各类脉冲状态所占的比例，再根据所占比例的大小，建立控制模式，自动调节被控参数	用计算机软件进行处理	可对进给速度、脉冲间隔参数实施调节控制

表 3.2-9 自适应控制组成及作用

部件名称	组　成	作　用
单板微处理机	Z80CPU 中央处理单元、2732 可编程只读存储器、6116 读写存储器（RAM）、Z80PIO 并行输入/输出接口、Z80CTC 计数器/定时器、数字键、功能键、七段 LED 显示器、其他 74LS 系列芯片若干	1）利用 Z80CTC 对石英晶振分频计数，产生稳定可靠的脉冲振荡源 2）实时统计开路、火花放电、短路三种脉冲状态，并根据统计结果，瞬时调整进给频率，保证跟踪紧密，加工平稳 3）向控制机发出短路回退信号，并在短路状态消除后，恢复正常进给 4）提供工艺参数库给用户选择使用
电流选择及初级驱动	前置放大器	1）将石英晶振分频计数产生的矩形脉冲信号放大，使它有足够的功率来推动功率放大级 2）由单板微机 PIO 输出的信号电平选择控制前置放大器是否工作。前置放大器又分别控制功率放大管，从而通过功率放大管的选择使用，实现加工电流大小的选择
采样检测鉴别	由电压比较器等组成采样检测鉴别电路	对加工放电间隙电压进行采样检测，准确地识别和区分开路、短路和火花放电三种状态
功率放大	功率放大板	将脉冲信号进行功率放大，使火花放电加工能顺利进行

高速走丝线切割机床的自适应控制系统由于走丝系统、工作液等的不确定因素较多，因此虽然开发多年，但成熟应用的不多。相反，低速走丝线切割机床的自适应控制系统已普遍成熟应用，配合工艺数据库或专家系统取得了很好的效果。

4 数控装置与机床电气

4.1 数控功能要求、结构与分类

电火花线切割加工机床的数控装置即数控系统通常应包括下列功能。

1）编辑功能　程序输入（键盘、纸带或磁盘、联机通讯）、编辑（检查、修改、删除、插入、复制等）功能，程序校验（空运行、作图）等。此外，有些控制系统，尤其是慢走丝线切割机控制系统，还具有自动编程功能。

2）轨迹控制　即精确控制电极丝相对于工件的运动轨迹，以获得所需的形状和尺寸。其中包括直线、圆弧插补控制，图形的缩放、坐标变换、任意角度旋转、循环（平移）、反向及清角加工，背隙、间隙（线径）补偿等功能。此外，部分机床还需多轴联动如锥度、上下异形等功能。

3）加工控制　主要包括对伺服进给速度、电源装置、走丝机构、工作液系统以及其他的机床操作控制。此外，断



电保护、断丝保护（断丝停工作液、停运丝、切断脉冲电源、断点记忆及断丝回退等）、短路自动回退、自动定中心、定端面、加工结束自动关（停）机及安全控制和自诊断功能也是一个重要的方面。

电火花线切割机床的轨迹控制系统曾经历过靠模仿形控制、光电跟踪仿形控制，但现在已普遍采用数字程序控制，简称数字控制或数控（NC），并已发展到微型计算机直接控制（CNC）阶段。

加工控制中最主要的是伺服进给速度控制，实际上是控制线电极与工件之间的平均火花放电间隙，使之为某一设定的常值，亦即使进给速度与工件材料的火花蚀除速度相平衡。这样，在对工作台（工件）相对于电极丝进行数字轨迹控制的同时，还要对其放电间隙（进给速度）进行伺服进给控制。

电火花线切割数控系统的原理是把图样上工件的形状和尺寸编制成线切割程序指令，一般通过键盘或使用穿孔纸带或磁带或磁盘或联机通信，输给电子计算机的输入机构，计算机根据输入指令控制驱动电动机，由驱动电动机带动精密丝杠，使工件相对于电极丝作轨迹运动。图 3.2-111 所示为数字程序控制过程框图。

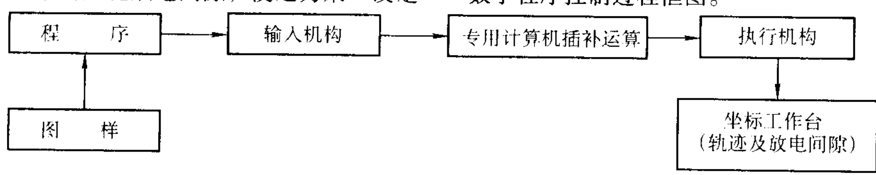


图 3.2-111 数字程序控制过程框图

图中专用计算机主要采用单板机、单片机、普通 PC（个人计算机）、工业控制计算机等多种，其组成的控制系统在功能、性能、价格等方面相差较大，详细介绍参见第3章。

4.2 伺服进给

线切割加工时不可能采用等速进给，而必须采用伺服进给，使工件在进给方向的进给速度等于蚀除速度而保持某一合适的放电间隙，其原理如下（以步进电机驱动为例）。

1）先测出工件和电极丝之间的放电间隙 间隙大，令加速进给；间隙小，放慢进给或暂停进给；间隙为零短路超过一定时间时，令电极丝按原轨迹回退，以消除短路状态。

由于实际放电间隙很小，更难于测量瞬时值，故常测量与放电间隙大小有一定关系的间隙电压，一般测间隙平均电压，个别也有测间隙平均开路电压等的。

2）将测得的间隙电压输入给“变频电路” 它实际为一电压－频率（$V-f$）转换器，根据间隙电压的大小，正比输出一定频率的脉冲串，通常以中断的方式输入计算机，由计算机运算决定是否需在 X 方向或 Y 方向正走或反走一步。这样，间隙大、间隙电压高，变频电路输出脉冲串的频率亦高，X 或 Y 方向的进给速度也就高。反之则低，则停止进给，从而实现了线切割加工的自动伺服进给。

若线切割机床不处于加工状态，脉冲电源不工作时，需要人工使工作台进给一段距离，则可将自动伺服进给的开关由“自动”挡改换到“人工”挡，内部电路提供一直流电压代替放电间隙的平均电压，再经电压-频转换器，变频电路输出一频率较高的脉冲串，输入计算机运算后驱动步进电动机在 X 或 Y 方向进给。

3）由步进电动机驱动工作台（工件）在 X 或 Y 方向进给 步进电动机有二相、三相、四相、五相等多种型号，国产高速走丝电火花线切割机床中常用的是 75BF003 型三相反应式步进电动机，图 3.2-112 为其结构示意图。图中转子上仅画出 4 个齿，实际转子上有 40 个小齿，定子上有三对开有小齿的（A、B、C 三相）磁极。A、B、C 三相可单独或同时轮流通电，通电时磁极产生磁力吸引转子转成某一位置。

控制步进电动机转动的方式有三种。

① 单三拍控制方式 图 3.2-112 所示实际为单三拍控制方式。首先有一相线圈（设为 A 相）通电，则转子上 1、3 两齿被磁极 A 吸住，转子就停留在这个位置上，如图 3.2-112 a 所示。

然后，B 相通电，A 相断开，则磁极 B 产生磁场，而磁极 A 的磁场消失。磁极 B 的磁场就把离它最近的齿（2、4 齿）吸引过去。这样转子位置自图 3.2-112 a 逆时针转动了 30°，停在如图 3.2-112 b 的位置上。

再接下去，若使 C 相通电、B 相断开，则根据同样道理，转子又逆时针旋转 30°，停留在图 3.2-112 c 的位置上。

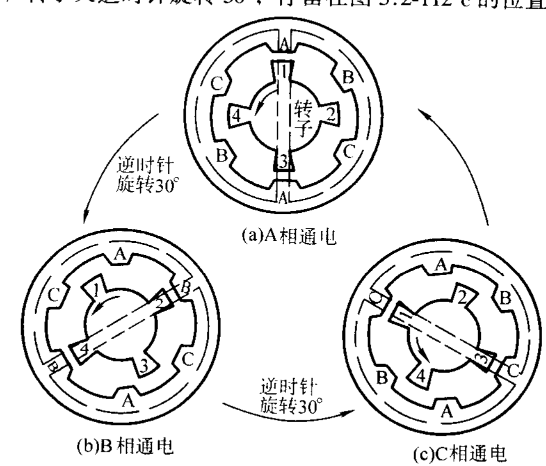


图 3.2-112 单三拍控制方式

若再使 A 相通电、C 相断开，那么转子再逆转 30°，使磁极 A 的磁场把 2、4 两个齿吸住。

这样按 A→B→C→A→B→C→A…的次序轮流通电，步进电动机就一步一步地按逆时针方向旋转。通电线圈每转换一次，步进电动机旋转 30°。

如果步进电动机通电线圈转换的次序倒过来，按 A→C→B→A→C→B→A→…的顺序进行，则步进电动机将按顺时针方向旋转。通电顺序与旋转方向的关系可以形象地用图 3.2-113 表示。

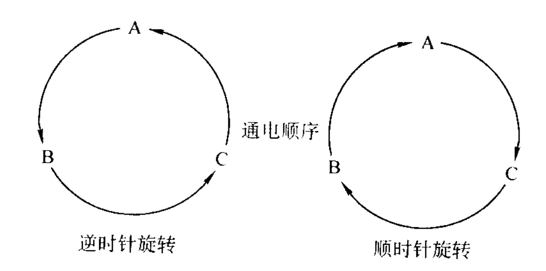


图 3.2-113 通电顺序与顺逆转向

要改变步进电动机的旋转方向，可以在任何一相通电时进行。例如，通电顺序可以是 A→C→A→B→C→A→B→A→

C，步进电动机将顺时针走一步，逆时针走五步后，再顺时针走两步。

上述控制方案称为单三拍控制，每次只有一相线圈通电。在转换时，一相线圈断电时另一相线圈刚开始通电，不能承受力矩，容易失步（即不按输入信号一步步转动），另外单用一相线圈吸引转子，容易在平衡位置附近振荡，稳定性不好，无法使用，故只能用以说明原理，实际上常采用以下的控制方式。

② 六拍控制方式　六拍控制方式中通电顺序按 A→AB→B→BC→C→AC→A→…进行（即一开始 A 相线圈通电，而后转换为 A、B 两相线圈同时通电，单 B 相线圈通电，再 B、C 两相线圈同时通电……）。每转换一次，步进电动机逆时针旋转 15°，如图 3.2-114 所示。

若通电顺序反过来，则步进电动机顺时针旋转，如图 3.2-115 所示。

这种控制方式因转换时始终保证有一相线圈通电，故工作较稳定，不易丢步。而且六拍控制方式的步距比单三拍缩小了一半。

③ 双三拍控制方式　在双三拍控制方式中，通电顺序按 AB→BC→AC→AB…（逆转）或 AB→AC→BC→AB…AB（顺转）进行，如图 3.2-116 所示。

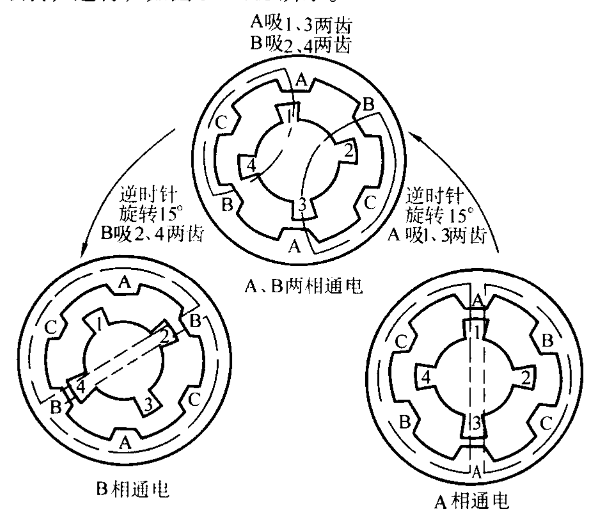


图 3.2-114　六拍控制方式（一）

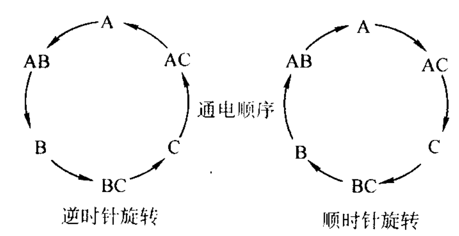


图 3.2-115　六拍控制方式（二）

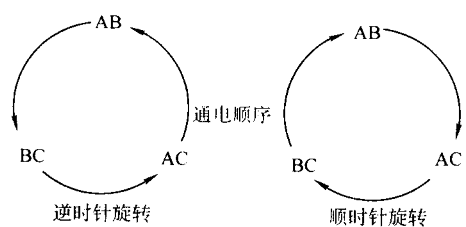


图 3.2-116　双三拍控制方式

在这种控制方式中每次都是两相线圈同时通电，而且转换过程中始终有一相线圈保持通电不变，因而工作稳定，不易丢步。而步距与单三拍控制一样。

步距角的计算。在三相步进电动机中，三步后转子旋转了一个齿。那么，定子的相数乘上转子的齿数就是转子旋转一周（即 360°）所需的步数。这样步进电动机每一步旋转的角度——称为步距角 θ，可由下列公式计算：

$$步距角\ \theta = \frac{360°}{定子的相数\ M \times 转子的齿数\ N}$$

常采用的步进电动机是 75BF003 型三相步进电动机。它的转子有 40 个齿（见图 3.2-117），所以双三拍时的步距角

$$\theta = 360°/(3 \times 40) = 3°$$

即每步旋转 3°，在六拍控制方式中步距角为上面双三拍时计算结果的一半，即 1.5°，相当于进行了 2 细分。

步进电动机的 A、B、C 各相，通常接直流电源，每相中串接有限流电阻（或采用恒流源电路）和大功率三极管。当三极管导通时，直流电源限流，每相有 2～2.5 A 的电流，可以产生足够的驱动力矩。

目前高速走丝电火花线切割机床的数控系统的执行机构大多采用较简单的、如上所述的步进电动机开环系统，而低速走丝线切割机床的数控系统则大都用伺服电动机加码盘的半闭环系统，仅在一些少量的超精密线切割机床上采用了伺服电动机加磁尺或光栅的全闭环数控系统。

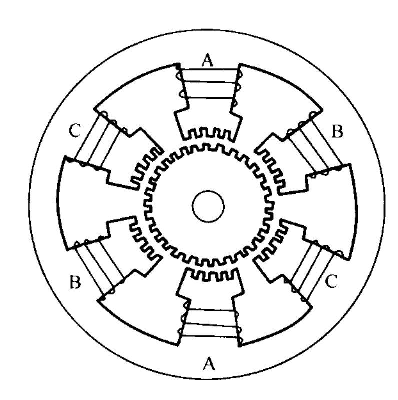


图 3.2-117　75BF003 型三相步进电动机

全闭环、半闭环原理概略框图分别见图 3.2-118、图 3.2-119。

图中伺服电动机通常为交流或直流电机，配上专用伺服驱动器，完成上述功能。类似如前所述步进电机驱动一样，控制系统根据加工情况，发进给速度、方向等信号给驱动器接口，从而驱动电机作所需进给，完成伺服控制。

在全闭环控制中，驱动器依靠外部编码器（安装在机床上的光栅、磁栅尺等）得到机械位置的反馈信号，及时修正位置，因此控制精度较高，但成本亦较高。

4.3　机床电气

机床电器控制电路的控制内容及控制功能见表 3.2-10。

随着集成电路集成度的提高、计算机技术及数控技术的进步，近几年来脉冲电源、机床电气已不再是独立的部分，而是作为机床数控系统的一部分融合在控制系统中。尤其在低速走丝线切割机床控制系统中，这种现象更是普遍。像脉冲电源的脉冲宽度、间隙宽度、峰值电压等电源参数，伺服进给的方式和方法及机床电气的工作液泵开关、运丝启停等相关操作，均可通过操作计算机键盘，依靠软件来完成。总之，许多原本用硬件实现的功能，纷纷被软件所取代，使得功能组合更合理、更完善，自动化程度更高，操作更简便，可靠性也得到进一步提高。



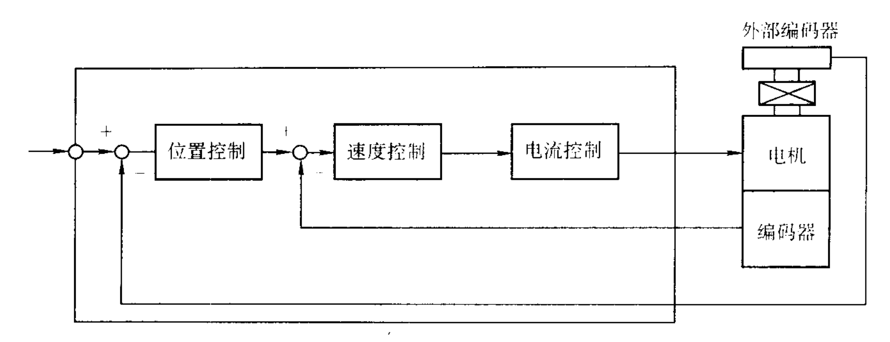


图 3.2-118　全闭环概略框图

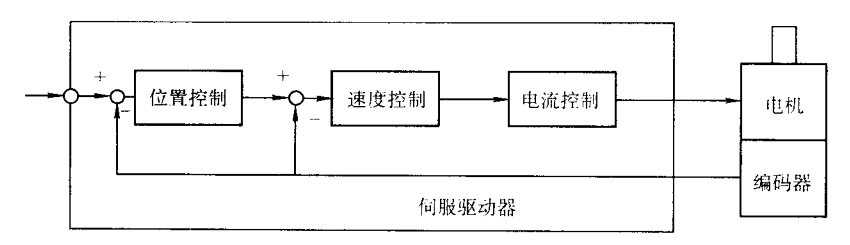


图 3.2-119　半闭环概略框图

表 3.2-10　机床控制电路的控制内容及控制功能

控制项目	控制内容	控制功能
走丝控制	正向、反向运转	快速走丝方式，电极丝正向、反向交换运转
	调速	走丝速度控制
	断丝保护	断丝停车、停止加工
	电机制动	快速走丝方式走丝停止与断丝停止时快速制动
走丝换向控制	停加工脉冲电源	快速走丝方式走丝方向改变时停加工脉冲电源
	停计算机运算	快速走丝方式走丝方向改变时停计算机运算
工作台控制方式的选择	自动	由切割轨迹控制系统自动控制工作台移动
	手动	手动控制工作台移动
	点动	手动点动调整工作台的坐标位置
限位控制	运动部件限位	坐标工作台与快速走丝机构限位，使其不超出一定位置
照明控制	机床照明	控制机床照明灯启停
	划线照明	控制机床划线台照明灯启停
其他控制	工作液泵启停	控制工作液泵电机启动停止
	自动绕丝	控制绕丝电机启停
	垂直检具	供给电极丝垂直检具电源

编写：裴景玉（上海交通大学）
周大农（苏州沙迪克三光机电有限公司）



第3章 电火花线切割机控制系统及编程

1 插补原理

1.1 逐点比较法插补原理

逐点比较法原理是：微机在控制加工过程中，能逐点地计算和判别加工偏差，以控制电机旋转实现进给运动。

(1) 逐点比较法直线插补

对于逐点比较法直线插补来说，如果把直线段的起点坐标放在坐标系的原点时，则任何一条直线段总是落在这四个象限中的某一象限。

1) 在第一象限内的直线插补　在第一象限中给出直线段 OP，如图 3.3-1 所示，可取 OP 起点为坐标原点，则 OP 线段把第一象限平面划分成两个区域：位于 OP 上方的为 A + 区域；位于 OP 下方的为 A − 区域，并形成三个点集：

第一个点集是重合于直线段 OP 上的所有点；

第二个点集是位于 A + 区域内的所有点；

第三个点集是位于 A − 区域内的所有点。

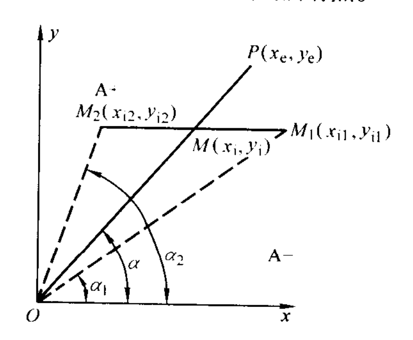


图 3.3-1　两个区域，三个点集

在 OP 直线上任取一点 $M(x_i, y_i)$，在与 M 点等高位置上，在 A − 区域内取一点 $M_1(x_{i1}, y_{i1})$，在 A + 区域内取一点 $M_2(x_{i2}, y_{i2})$，连接 OM_1、OM、OM_2 三条直线，与 x 轴正方向夹角 α_1、α、α_2 大小不一样，并有

$$\alpha_1 < \alpha < \alpha_2$$

于是它们的斜率也不一样，即

$$\tan\alpha_1 < \tan\alpha < \tan\alpha_2$$

由于直线段 OP 的斜率为：

$$\tan\alpha = y_e / x_e = y_i / x_i$$

从而可得 OP 直线的方程为：

$$x_e y_i - y_e x_i = 0$$

由于 $\tan\alpha_2 > \tan\alpha$，即 $x_e y_{i2} > y_e x_{i2}$，所以

$$x_e y_{i2} - y_e x_{i2} > 0$$

又由于 $\tan\alpha_1 < \tan\alpha$，即 $x_e y_{i1} < y_e x_{i1}$，所以

$$x_e y_{i1} - y_e x_{i1} < 0$$

现在，把第一象限内任意一点 M 的坐标设为 (x_i, y_i)，用 F_i 代表 M 点的偏差值，并定义为：

$$F_i = x_e y_i - y_e x_i \qquad (3.3\text{-}1)$$

则当 $F_i = 0$ 时，表示 M 点在 OP 直线上；当 $F_i > 0$ 时，表示 M 点在 A + 区域内；当 $F_i < 0$ 时，表示 M 点在 A − 区域内。

式 (3.3-1) 称为直线插补的偏差判别式，或原始判别式。以后为方便起见，将 F_i 记为 F。当 $F > 0$ 时，点在 A + 区，OP 上方，为了逼近直线 OP，必须沿 + X 方向上走一步，未穿过 OP，则此时仍有 $F > 0$，故继续沿 + X 方向走一步，直到穿过 OP 走入 A − 区域内为止。

同理可得，当 $F < 0$ 时，向 + Y 走一步，再判断，若仍有 $F < 0$，则再次沿 + Y 方向走一步，直到穿过 OP 进入 A + 区域内为止。

如果偏差判别式算出 $F = 0$，则说明点正好落在直线 OP 上。由于未到终点前不能停止运动，但又不能沿着 OP 方向走斜线，于是规定按 $F > 0$ 来处理。

由于偏差判别式的计算是求两组乘积之差，而且要对每一点都进行如此复杂的运算，因此，这种偏差计算方法将直接影响插补速度。为了简化偏差计算方法，我们把上述乘法运算过程变为加、减运算过程，因此对原判别式作如下变换。

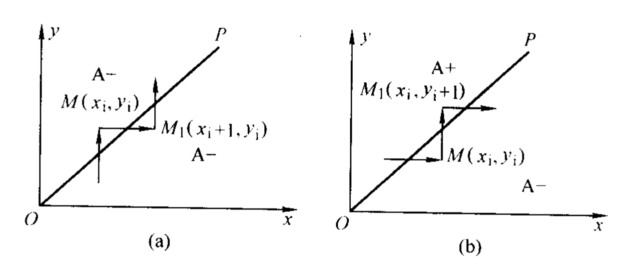


图 3.3-2　斜线加工偏差

参看图 3.3-2a，当点落在 A + 区域内的 $M(x_i, y_i)$ 点上时，显然 $F > 0$，应沿 + X 方向进给一步而到达 $M_1(x_i + 1, y_i)$ 点。令 M_1 点的新偏差为 F_1，由式 (3.3-1) 可得

$$F_1 = x_e y_i - y_e (x_i + 1) = F - y_e \qquad (3.3\text{-}2)$$

式中 F 代表进给一步前的老偏差，y_e 为已知的终点坐标值。所以，当 $F > 0$ 时，应向 + X 方向进给一步到达新的一点，而该点的新偏差 F_1 等于迁移点的老偏差减去终点坐标值 y_e。同理，若 M 点落在 A − 区域内，即 $F < 0$ 时，应向 + Y 方向进给一步而到达 $M_1(x_i, y_i + 1)$ 点，如图 3.3-2b 所示，则 M_1 处的新偏差 F_1 为：

$$F_1 = x_e (y_i + 1) - y_e x_i = F + x_e \qquad (3.3\text{-}3)$$

即到达 M_1 点时的新偏差 F_1 等于前一点的老偏差加上终点坐标值 x_e。

可见，利用进给前的偏差值 F 和终点坐标 (x_i, y_i) 之一进行加/减运算求得进给一步后的新偏差 F_1，作为确定下一步进给方向的判别依据。显然，偏差运算过程大大简化了。并且，对于新偏差仍有：

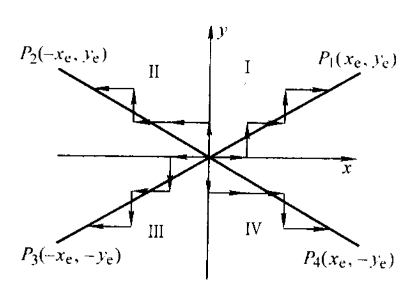
当 $F_1 \geqslant 0$ 时，沿 + X 方向进给一步；

当 $F_1 < 0$ 时，沿 + Y 方向进给一步。

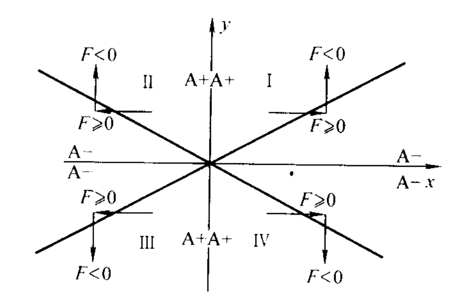
当进给完成以后，F_1 就是下一步的 F 值。

2) 其他象限中的偏差判别及进给方向　如果需其他三个象限内加工直线，可用第一象限方法推导出偏差公式和进给方向。推导偏差判别式时，x，y 坐标取绝对值，不考虑符号。由图 3.3-3a 可见，第一象限内直线 OP_1 与第三象限内直线 OP_3 是对称与原点的。

OP 的终点为 $P(x_e, y_e)$，而 OP_3 的终点为 $P_3(-x_e, -y_e)$；第二象限内直线 OP_2 与第四象限内直线 OP_4 也是对称于原点的。显然，每组对称图形之间所对应的进给方向相反。



(a) 不同象限进给方向的对称性



(b) F 值与进给方向的关系

图 3.3-3 各象限中偏差判别与进给方向

根据以上分析，可将四个象限中直线插补公式及进给方向列于表 3.3-1，而偏差值 F 与进给方向的关系可以形象地由图 3.3-3b 来表示。图中的箭头表示进给方向，F 为偏差值，写在箭头附近的 $F \geqslant 0$ 或 $F<0$ 代表八个区域中每个区内点的偏差值是大于、等于还是小于零。

表 3.3-1 直线插补的进给方向及差补公式

直线所在的象限	当 $F \geqslant 0$ 时		当 $F<0$ 时	
	进给坐标	计算公式	进给坐标	计算公式
Ⅰ (L_1)	$+\Delta x$	$F-y_e \to F$	$+\Delta y$	$F+x_e \to F$
Ⅱ (L_2)	$+\Delta y$	$F-x_e \to F$	$-\Delta x$	$F+y_e \to F$
Ⅲ (L_3)	$-\Delta x$	$F-y_e \to F$	$-\Delta y$	$F+x_e \to F$
Ⅳ (L_4)	$-\Delta y$	$F-x_e \to F$	$+\Delta x$	$F+y_e \to F$

3）终点判断　到达终点（x_e，y_e）时必须自动停止进给，因此，在插补过程中，每走一步就要和终点坐标比较一下，如果没有到达终点，就继续插补运算，如果已到达终点就必须自动停止插补运算。

判断是否到终点，一般有以下两种方法。

① 利用所走过的总步数是否等于终点坐标之和。为此，可比较每一个插值点的坐标值之和（x_i+y_i）是否等于终点坐标值之和（x_e+y_e），若相等则终点已到，否则终点未到，继续插补。

② 取终点坐标 x_e 和 y_e 中的较大者作为终判计数器的初值，我们称此较大者为长轴，另一为短轴。在插补过程中，只要沿长轴方向上有进给脉冲，终判计数器就减 1，而沿短轴方向的进给脉冲不影响终判计数器。由于插补过程中长轴的进给脉冲数一定多于短轴的进给脉冲数，长轴总是最后到达终点值，所以，这种终点判断方法是正确的。

4）插补程序的流程图　逐点比较法直线插补工作过程可归纳为以下四步。

① 终点判别　看是否已到终点，若以到达终点，就停止插补，若未到达终点，则重复 2 至 3 步的工作。第一象限逐点比较法直线插补流程图如图 3.3-4 所示。

② 偏差判别　即判别上一步进给后的偏差值是 $F \geqslant 0$ 还是 $F<0$。

③ 进给　即根据偏差判别的结果和插补所在象限决定在什么方向上进给一步。

④ 偏差运算　即计算出进给一步后的新偏差值，作为下一步进给的判别依据。

（2）逐点比较法圆弧插补

加工圆弧时，可用加工点到圆心的距离和圆弧半径相比较来反映加工偏差。所要加工的圆弧可以在四个不同的象限中：可以按顺时针方向进给，也可以按逆时针方向进给。为便于表示圆弧所在的象限及进给方向，我们用 SR1、SR2、

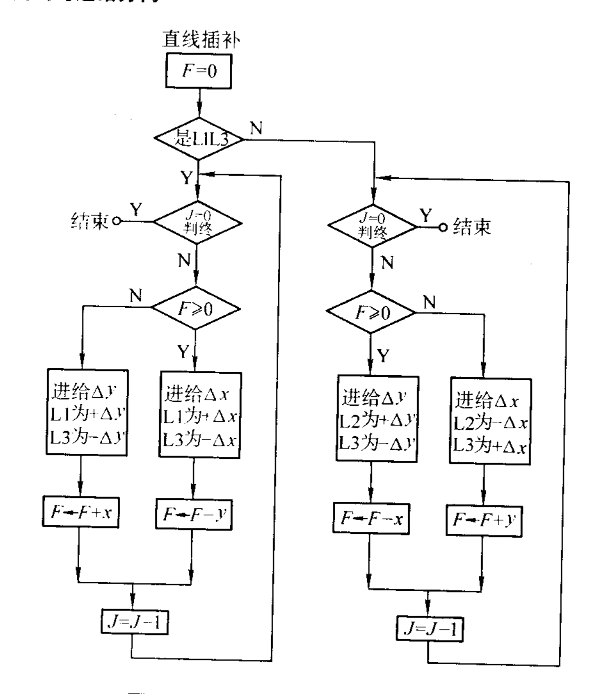


图 3.3-4 逐点比较法直线插补流程图

SR3、SR4 依次表示第 1、2、3、4 象限中的顺圆弧，用 NR1、NR2、NR3、NR4 分别表示第 1、2、3、4 象限中的逆圆弧。

1）第一象限圆弧插补算式　用逐点比较法进行圆弧插补时，若圆心定在坐标原点，并设圆弧起点 P 的坐标值为（x_0，y_0），终点 Q 的坐标值为（x_e，y_e），可得：

$$R^2 = x_0^2 + y_0^2 = x_e^2 + y_e^2$$

显然，对于圆内的点，到圆心的距离小于半径 R；而对于圆外的点，到圆心的距离大于半径 R。因此，可以定义任一点到圆心的距离与半径 R 之差作为偏差判别式。

对于第一象限的逆圆弧来说，圆弧 PQ 把第一象限划分成两个区，构成三个点集，如图 3.3-5 所示。其中：

第一个点集为圆弧 PQ 上的所有点；

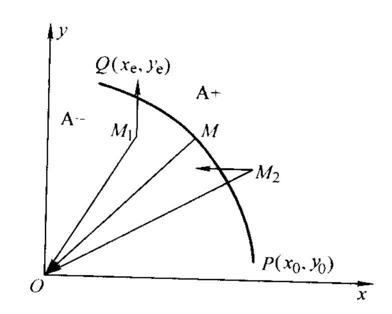


图 3.3-5 三个点集，两个区域



第二个点集为圆外区域 A+ 内的所有点；

第三个点集为圆内区域 A- 内的所有点。

图 3.3-5 中 M_1、M、M_2 三点分别落在圆弧内、圆弧上、圆弧外，它们与圆心的连线为 OM_1、OM、OM_2，则

$$OM_2^2 = x_i^2 + y_i^2 = R^2 = x_0^2 + y_0^2$$

$$OM_1^2 = x_i^2 + y_i^2 = R^2 = x_0^2 + y_0^2$$

$$F = x_i^2 + y_i^2 - R^2 \quad (3.3\text{-}4)$$

因此，平面上任一点（x_i，y_i）与圆弧之间的偏差值 F 为：

当 $F=0$ 时，代表这一点在圆弧上；

当 $F>0$ 时，代表这一点在 A+ 区域内，即在圆弧外；

当 $F<0$ 时，代表这一点在 A- 区域内，即在圆弧内。

显然，为了使加工轨迹逼近圆弧，当 $F>0$ 时，必须从 A+ 区域穿过圆弧走入 A- 区，因此应沿 $-x$ 轴方向进给一步；当 $F<0$ 时，应沿 $+y$ 方向进给一步；当 $F=0$ 时，也按 $F>0$ 来处理。

偏差判别式（3.3-4）的缺点是先要逐点进行平方计算，然后做加减运算，既麻烦又费时，为此要找到和直线插补同样简便的偏差计算方法。

如图 3.3-6 所示，由于 M_1 点在 A+ 区内，故

$$F = x_i^2 + y_i^2 - R^2$$

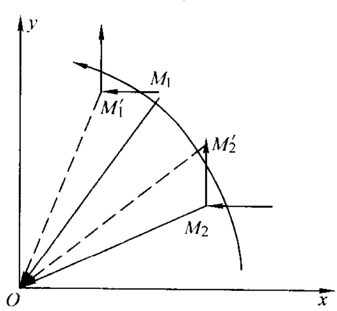


图 3.3-6　NR1 逆圆差补的进给

因此进给 $-\Delta x$ 一步，到达新的一点 M'_1，其坐标值为（x_i-1，y_i），根据式（3.3-4）可求得到达 M'_1 点除的新偏差值 F' 为

$$F' = (x_i-1)^2 + y_i^2 - R^2$$
$$= x_i^2 + y_i^2 - R^2 - 2x_i + 1 = F - 2x_i + 1 \quad (3.3\text{-}5)$$

因为 M_2 在 A- 区内，故 $F<0$，因此应进给 $+\Delta y$ 一步，到达 M'_2 点，如果点 M_2 的坐标值为（x_i，y_i），则 M'_2 的坐标值为（x_i+1，y_i），所以在 M'_2 点除的新偏差值 F' 为

$$F' = x_i^2 + (y_i+1)^2 - R^2$$
$$= x_i^2 + y_i^2 - R^2 + 2y_i + 1 = F' - 2y_i + 1 \quad (3.3\text{-}6)$$

综上可得，要加工 NR1 圆弧，对于在 A+ 区内的点应沿 $-x$ 方向进给一步，到达新点的偏差值为 $F' = F - 2x_i + 1$；对于在 A- 区内的点应沿 $+y$ 轴方向进给一步，到达新点的偏差值为 $F' = F + 2y_i + 1$。其中，F 为进给前的老偏差，x_i 和 y_i 为进给前的那点的坐标，因此新偏差值可以通过老偏差值来求得。注意，此时还应及时修正中间点的坐标值（即 $x'_i = x' - 1$ 和 $y'_i = y' + 1$），供计算下一点偏差值使用，即 F'、x'_i、y'_i 依次作为 F、x'、y'。

同理，可以推导出 SR1 圆弧的插补规律，参见图 3.3-7。

对于在 A+ 区内的 M_1（x_i，y_i）点，其偏差 $F>0$，应沿 $-y$ 方向进给一步，到达新点 M'_1（x_i，y_i-1），新偏差值为 $F' = F - 2y_i + 1$。对于在 A- 区内的 M_2（x_i，y_i）点，其偏差 $F<0$，应沿 $+x$ 轴方向进给一步，到达新点 M''_1（x_i+1，y_i），新偏差值 $F' = F + 2x_i + 1$。同样，在完成偏差值运算时，还应完成坐标修正运算，即 $x'_i = x'_i + 1$ 和 $y'_i = y'_i - 1$。

2）其他象限中逐点比较法圆弧插补的偏差公式和进给方向　其他各象限中顺、逆圆弧都可以与第一象限比较而得出各自的偏差计算公式及其进给脉冲的方向，因为其他象限的所有圆弧总是与第一象限中的 NR1 或 SR1 互为对称，如图 3.3-8 所示。

对于图 3.3-8a，SR4 与 NR1 对称于 x 轴，SR2 于 NR1 对称于 y 轴，NR3 与 SR2 对称于 x 轴，NR3 与 SR4 对称于 y 轴。

对于图 3.3-8b，SR1 与 NR2 对称于 y 轴，SR1 与 NR4 对称于 x 轴，SR3 与 NR2 对称于 x 轴，SR3 与 NR4 对称于 y 轴。

显然，对称于 x 轴的一对圆弧沿 x 轴的进给方向相同，而沿 y 轴的进给方向相反；对称于 y 轴的一对圆弧沿 y 轴的进给方向相同，而沿 x 轴的进给方向相反。所以，在圆弧插补中，沿对称轴的进给方向相同，沿非对称轴的进给方向相反；其次，所有对称圆弧的偏差计算公式，只要取起点坐标的绝对值，均与第一象限中 NR1 与 SR1 的偏差计算公式相同。所以，八种圆弧的插补计算公式及进给方向可列如表 3.3-2 所示。

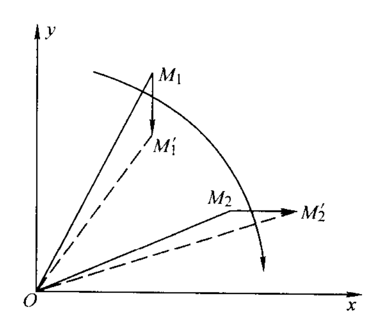


图 3.3-7　SR1 顺圆差补的进给

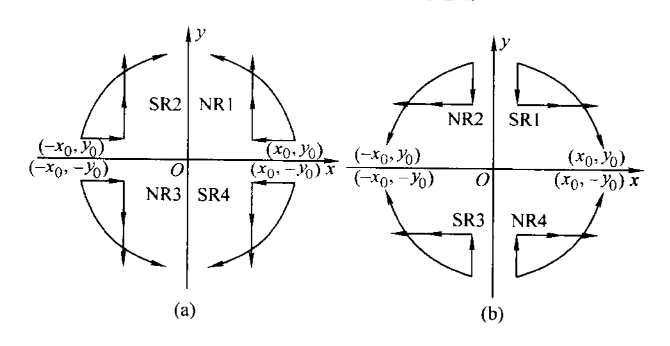


图 3.3-8　四个象限中圆弧的对称性

表 3.3-2　八种圆弧插补的计算公式和进给方向

圆弧类型	$F \geqslant 0$ 时的进给		$F<0$ 时的进给	
	进给坐标	计算公式	进给坐标	计算公式
SR1	$-\Delta y$	$F-2y+1 \to F$ $y-1 \to y$ $x \to x$	$+\Delta x$	$F+2x+1 \to F$ $x+1 \to x$ $y \to y$
SR3	$+\Delta y$		$-\Delta x$	
NR2	$-\Delta y$		$-\Delta x$	
NR4	$+\Delta y$		$+\Delta x$	
SR2	$-\Delta x$	$F-2x+1 \to F$ $x-1 \to xy \to y$	$+\Delta y$	$F+2y+1 \to F$ $y+1 \to y$ $x \to x$
SR4	$+\Delta x$		$-\Delta y$	
NR1	$+\Delta x$		$+\Delta y$	
NR3	$-\Delta x$		$-\Delta y$	



3）终点判别 圆弧插补的终点判别方法和直线插补的终判原理一样，常取 x 方向的总步数和 y 方向总步数中的最大步数作为终点判断的依据。这里，x 方向或 y 方向的总步数是圆弧终点坐标值（对圆心的坐标值）与圆弧起点坐标值之差的绝对值。在插补过程中，只要沿长轴方向有进给脉冲，终判计数器就减1，只要终判计数器不为零，就重复插补过程，直到终判计数器为零，终点到，圆弧插补过程才停止。

4）逐点比较插补法圆弧程序流程 根据逐点比较法的特点和圆弧插补的规律，可概括出圆弧插补程序的流程图3.3-9所示。

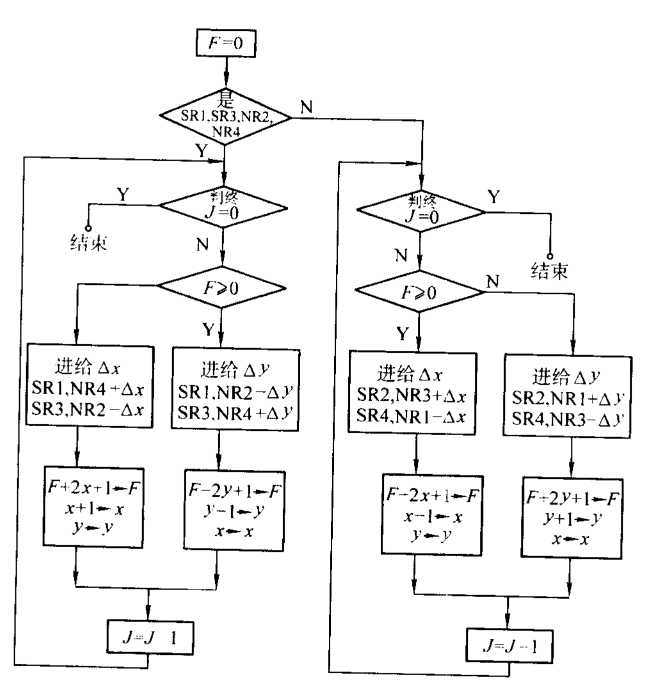


图3.3-9 圆弧逐点比较插补流程

由于起点坐标值和终点坐标值在以圆心为原点的坐标系中可以有正有负。因此，可以利用正、负号来确定所在的象限，利用起点坐标值和终点坐标值相对大小来确定是顺圆插补还是逆圆插补。实际的进给信号是根据偏差值 $F\geqslant0$ 还是 $F<0$ 以及圆弧插补的类型来决定的。常取 $|x_e-x_0|$ 和 $|y_e-y_0|$ 中的大数作为终判计数器的初值，但需要在终判计数器减1之前先判别刚才的进给信号与终判计数器设定值得关系，只有两者的坐标名相同，终判计数器才执行减1操作，否则保持不变。此时，较简单的处理方法是通过设定两个标志来识别。

1.2 双判别进给插补原理

逐点比较法每进给一步判定一下加工点的位置，根据判别式的符号，确定下一步该向 x 坐标方向或是 y 坐标方向进给。在逐点比较法的基础上，发展出新的插补方法——双判别进给法。这种方法是在进给之前，先计算一下 x 坐标方向或 y 坐标方向进给一步的偏差和对角线方向（x 和 y 同时走一步的方向）进给一步的偏差，选择偏差小的那个方向进给。

双判别进给法插补的优点如下。

① 插补精度高，小于或等于1/2个脉冲当量。

② 对多坐标也适用。

③ 在加工过程中，总有一个方向的步进电机转速是很均匀的，转速只与工作频率有关，这对驱动系统是有好处的。

④ 单位时间内的进给速度相对加快。

（1）双判别法直线插补原理

1）进给规则 若加工的一段直线 OZ 位于第一象限，终点为 $Z(x_z, y_z)$，如图3.3-10所示，则直线方程为：

$$x_z y - y_z x = 0$$

式中，x、y 为 OZ 上动点坐标值。

当 $x_z > y_z$ 时，进给方向为 x 方向和对角线方向。

当 $x_z < y_z$ 时（如 Z' 点），进给方向为 y 方向和对角线方向，如图3.3-10所示。

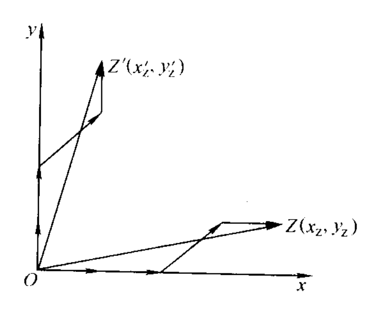


图3.3-10 双判别法进给方向

2）偏差判别公式 设 F（$F=x_z y - y_z x$）为加工点 $M(x, y)$ 对于直线的偏差函数，而某一时刻加工点为 $M(x, y)$，MQ 为 M 点到 OZ 直线的垂线，MN 为平行 y 轴到距离，$MN+y$ 即为直线 OZ 上 N 点的 y 坐标，如图3.3-11所示，则有：

$$F_M = x_z - y_z x = x_z(y+MN-MN) - y_z x$$

$$= x_z(y+MN) - y_z x - x_z MN = x_z y_N - y_z x_N - x_z MN$$

式中，x_N、y_N 为直线 OZ 上 N 点的坐标值。

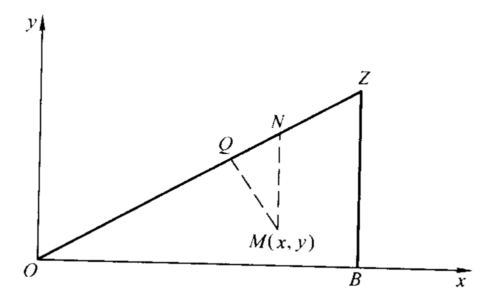


图3.3-11 加工点的偏差

因 N 点在直线上，故 $x_z y_N - y_z x_N = 0$，所以

$$F = -x_z MN$$

MQ 是 M 点到直线 OZ 的距离，即 $MQ \perp OZ$，显然 $\triangle OZB \backsim \triangle MNQ$，即

$$MQ = \frac{OB}{OZ} MN \qquad (3.3\text{-}7)$$

MQ 是加工点 M 到直线的垂线，距离最短。显然，MQ 是加工点对直线的偏差函数。加工点 M 可能在直线的下方、上方或直线上，用 ΔL 表示 MQ 的绝对值，即

$$\Delta L = |MQ| \qquad (3.3\text{-}8)$$

ΔL 称为加工点对于直线的偏差值，简称偏差。

将式（3.3-7）代入式（3.3-8）中得：

$$\Delta L = |MQ| = \frac{OB}{OZ}|MN| = \frac{x_z}{OZ}\frac{|F|}{x_z} = \frac{|F|}{OZ} \qquad (3.3\text{-}9)$$

由此得出结论：加工点的偏差与偏差函数成正比。

为获得最小偏差，进给方向作如下规定：

当 $x_z \geqslant y_z$ 时，向 x 方向或对角线方向偏差小的方向进给；

当 $x_z < y_z$ 时，向 y 方向或对角线方向偏差小的方向进给。

为方便讨论，假定 $x_z \geqslant y_z$。向 x 方向走一步，偏差函数为 $F(\Delta x)$，向对角线走一步，偏差函数为 $F(\Delta x,\Delta y)$。则

$$F(\Delta x) = x_z y - (x+1)y_z = F - y_z$$

$$F(\Delta x) = x_z(y+1) - (x+1)y_z = F - y_z + x_z$$

比较 $|F(\Delta x)|$ 与 $|F(\Delta x, \Delta y)|$，选其小的方向进给。

$|F(\Delta x)| \leqslant |F(\Delta x, \Delta y)|$，则进给 Δx，$F = F_{m1}$ 作为下一步的偏差；

$|F(\Delta x)| > |F(\Delta x, \Delta y)|$，则进给 Δx，Δy，$F = F_{m2}$ 作为下一步的偏差。

当 $x_z < y_z$ 时推导相同。

3）双判别进给法直线插补流程图　双判别进给法直线插补工作流程如图 3.3-12 所示。

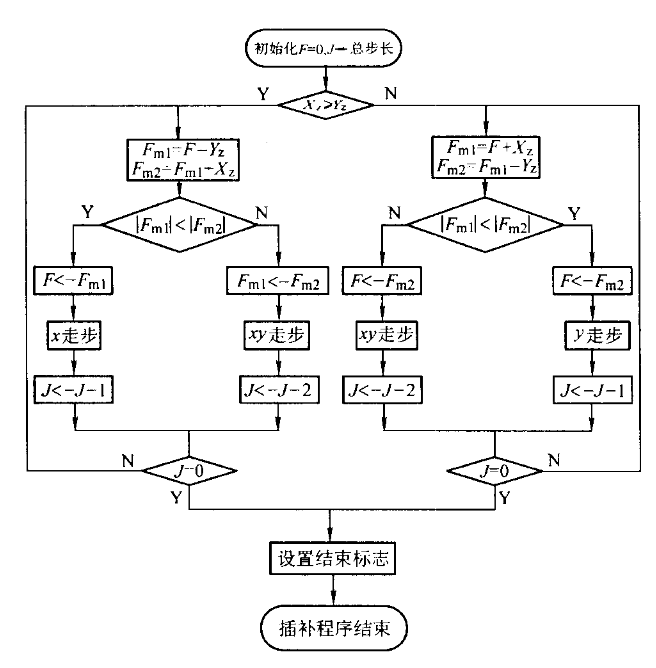


图 3.3-12　双判别进给法流程图

4）偏差估计　以第一象限 $x_z \geqslant y_z$ 为例，如图 3.3-13 所示，设 $M(x, y)$ 为已知加工点，向 x 方向进给一步的新加工点为 M_1，M_2 是向对角线方向进给一步的新加工点。点 M_1 对于直线的偏差为 M_1D_1，点 M_2 对于直线的偏差为 M_2D_2。由图 3.3-13 可看出：

$$M_1D_1 < M_1P \quad M_2D_2 < PM_2$$

故 $M_1D_1 + M_2D_2 < M_1P + PM_2 = M_1M_2 =$ 一个脉冲当量

因此，M_1D_1 和 M_2D_2 中较小者必定小于 1/2 个脉冲当量。而进给规则规定下一步进给方向是偏差最小的那个加工点，所以双判别进给法的直线插补每个加工点对于直线的偏差小于 1/2 个脉冲当量。

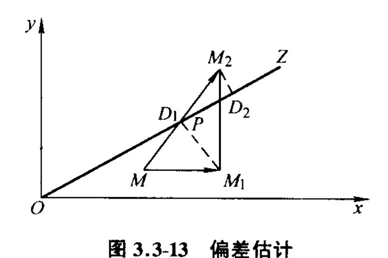


图 3.3-13　偏差估计

(2) 双判别进给圆弧插补

1）进给方式　对于圆弧而言，与逐点比较法一样，仍把圆弧中心作为坐标原点。设若加工第一象限圆弧，半径为 R，方向为逆圆。进给方式为：

当 $x > y$ 时，进给方向为 y 方向和对角线方向；

当 $x < y$ 时，进给方向为 x 方向和对角线方向。

2）判别公式　用双判别进给法，在八个区域中共有 16 种圆弧，如图 3.3-14 所示。各个圆弧的进给方向都在图中给出。按逐点比较处理方式，用坐标绝对值进行计算，插补计算可分为四种算法。

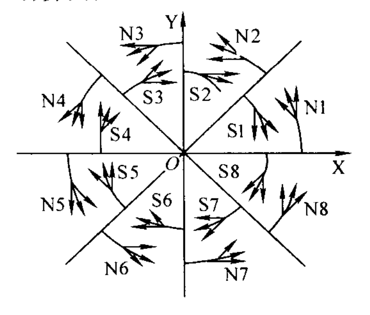


图 3.3-14　16 种圆弧进给方式

① 圆弧 N2、S3、N6、S7，x 轴为单进给坐标，且动点的 x 坐标绝对值呈减小趋势。算法如下：

$$F_{m1} = F_m - 2x_m + 1$$

$$F_{m2} = F_{m1} + 2Y_m + 1$$

若 $|F_{m1}| \geqslant |F_{m2}|$，则走双坐标，$|x_m|$ 减 1，$|y_m|$ 加 1。若 $|F_{m1}| \leqslant |F_{m2}|$，则走 x 坐标，$|x_m|$ 减 1。

② 圆弧 S2、N3、S6、N7，x 轴为单进给坐标，且动点的 x 坐标绝对值呈减小趋势。算法如下：

$$F_{m1} = F_m + 2x_m + 1$$

$$F_{m2} = F_{m1} - 2y_m + 1$$

若 $|F_{m1}| \geqslant |F_{m2}|$，则走双坐标，$|X_m|$ 减 1，$|Y_m|$ 加 1。若 $|F_{m1}| < |F_{m2}|$，则走 x 坐标，$|x_m|$ 减 1。

③ 圆弧 S1、N4、S5、N8，y 轴为单进给坐标，且动点的 y 坐标绝对值呈减小趋势。算法如下：

$$F_{m1} = F_m - 2y_m + 1$$

$$F_{m2} = F_{m1} + 2x_m + 1$$

若 $|F_{m1}| \geqslant |F_{m2}|$，则走双坐标，$|y_m|$ 减 1，$|x_m|$ 加 1。若 $|F_{m1}| < |F_{m2}|$，则走 y 坐标，$|y_m|$ 减 1。

④ 圆弧 N1、S4、N5、S8，y 轴为单进给坐标，且动点的 y 坐标绝对值呈减小趋势。算法如下：

$$F_{m1} = F_m + 2y_m + 1$$

$$F_{m2} = F_{m1} - 2x_m + 1$$

若 $|F_{m1}| \geqslant |F_{m2}|$，则走双坐标，$|y_m|$ 加 1，$|x_m|$ 加 1。若 $|F_{m1}| < |F_{m2}|$，则走 y 坐标，$|y_m|$ 加 1。

以上四种算法中，走双坐标时保留 F_{m2} 作为下一步的偏差，走单坐标时保留 F_{m1} 作为下一步的偏差。

综上所述，双判别进给法圆弧插补的四种类型，可用第一象限中的四种圆弧作为代表，即可分为 S1、N1、S2、N2 四种插补方式。

3）双判别进给法圆弧插补流程图　双判别进给法圆弧插补流程如图 3.3-15（第一种算法）所示。

例 1　分别用逐点比较法和双进给法直线插补原理计算第一象限直线，终点坐标 $Z(5, 3)$。

解：

1）逐点比较法插补直线，参见图 3.3-16a。

计算过程见表 3.3-3，初始 $F = 0$，$x_z = 5$，$y_z = 3$，$J = 5$；这里 J 计数为 x 轴步长投影和 y 轴步长投影总和。

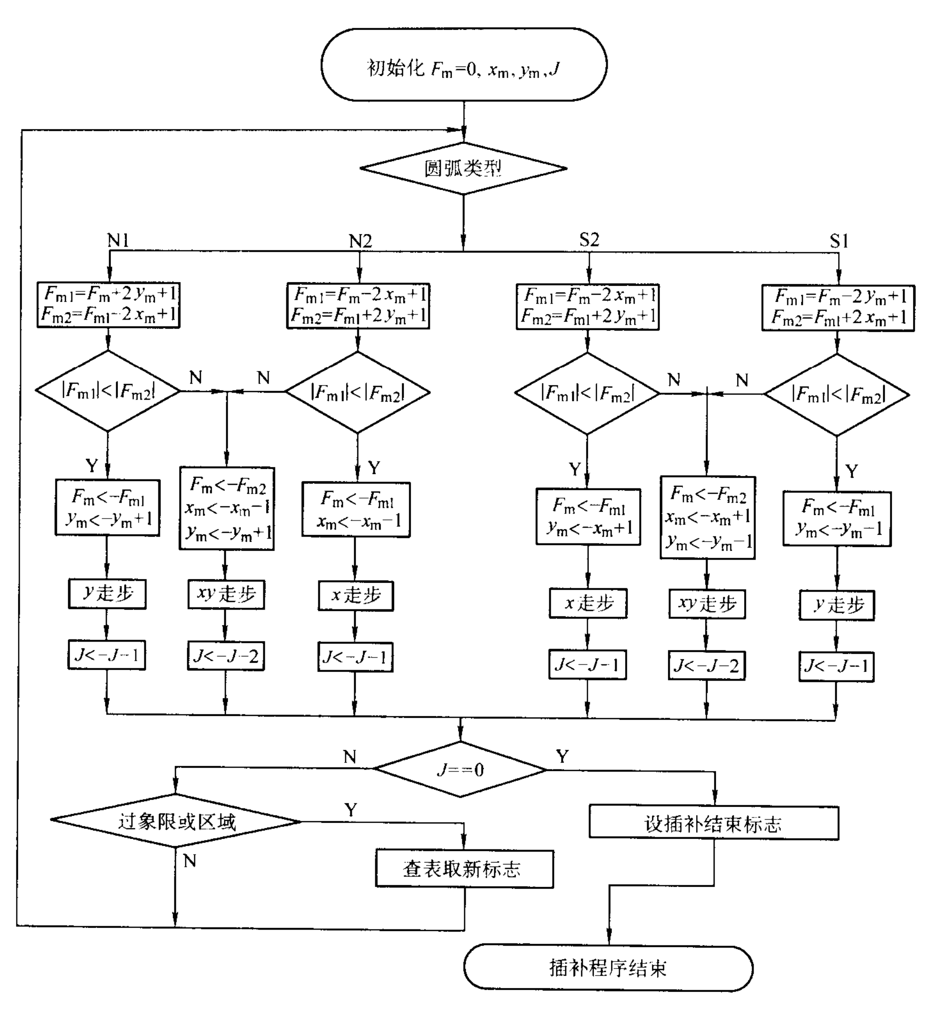


图 3.3-15　双判别进给法圆弧插补流程

表 3.3-3　直线逐步比较法计算过程

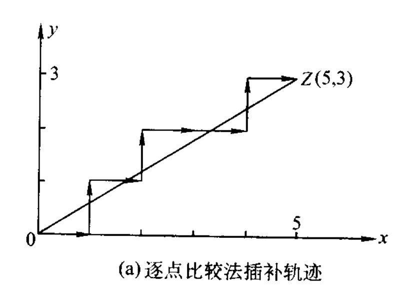
进给次数	进给判别	进给	偏差计算	J
1	$F=0\geqslant0$	$+\Delta x$	$F=F-y_z=-3$	$J=4$
2	$F=-3<0$	$+\Delta y$	$F=F+x_z=2$	—
3	$F=2\geqslant0$	$+\Delta x$	$F=F-y_z=-1$	$J=3$
4	$F=-1<0$	$+\Delta y$	$F=F+x_z=4$	—
5	$F=4\geqslant0$	$+\Delta x$	$F=F-y_z=1$	$J=2$
6	$F=1\geqslant0$	$+\Delta x$	$F=F-y_z=-2$	$J=1$
7	$F=-2<0$	$+\Delta y$	$F=F+x_z=3$	—
8	$F=3\geqslant0$	$+\Delta x$	$F=F-y_z=0$	$J=0$

2）双判别进给法插补直线，参见图 3.3-16b。

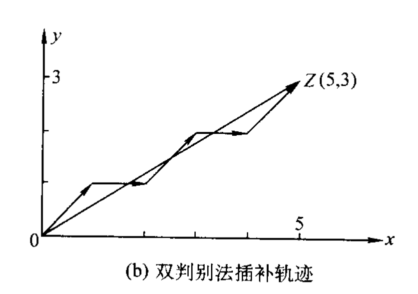
计算过程见表 3.3-4，初始 $F=0$，$x_z=5$，$y_z=3$，$J=3+5=8$。

表 3.3-4　直线双判别进给法计算过程

进给次数	偏差计算	偏差判别	进给	J
1	$F_x=-3, F_{xy}=2$	$\|F_x\|>\|F_{xy}\|, F=2$	$+\Delta x, +\Delta y$	$J=6$
2	$F_x=-1, F_{xy}=4$	$\|F_x\|<\|F_{xy}\|, F=-1$	$+\Delta x$	$J=5$
3	$F_x=-4, F_{xy}=1$	$\|F_x\|>\|F_{xy}\|, F=1$	$+\Delta x, +\Delta y$	$J=3$
4	$F_x=-2, F_{xy}=3$	$\|F_x\|<\|F_{xy}\|, F=-2$	$+\Delta x$	$J=1$
5	$F_x=-5, F_{xy}=0$	$\|F_x\|>\|F_{xy}\|, F=0$	$+\Delta x, +\Delta y$	$J=0$



(a) 逐点比较法插补轨迹



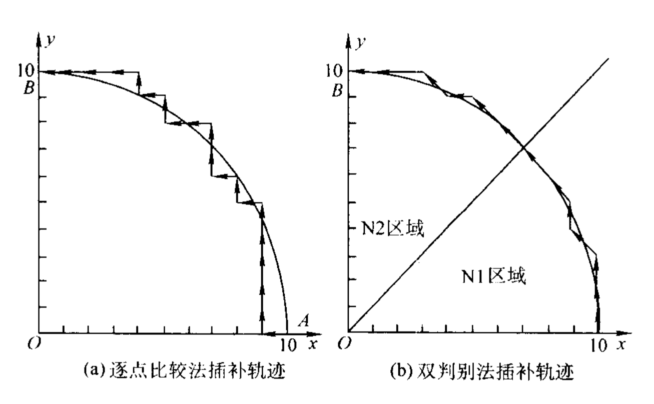
(b) 双判别法插补轨迹

图 3.3-16　直线插补轨迹

例2 分别用逐点比较法和双进给法圆弧插补原理计算第一象限逆圆，起点坐标 A（10，0），终点坐标 B（0，10）。

解：1）逐点比较法插补圆弧，见图 3.3-17a。

计算过程见表 3.3-5，初始 $F=0$，$x_m=10$，$y_m=0$，$J=10$。



(a) 逐点比较法插补轨迹　(b) 双判别法插补轨迹

图 3.3-17 逐点比较法与双判别法圆弧插补度比较

表 3.3-5 圆弧逐点比较法计算过程

进给次数	判别式	进给	$F>=0$ 时 $F=F-2x_m+1$ $F<0$ 时 $F=F+2y_m+1$	x_m	y_m	J
1	$F=0\geqslant 0$	$-\Delta x$	$F=-19$	9	0	9
2	$F=-19<0$	$+\Delta y$	$F=-18$	9	1	0
3	$F=-18<0$	$+\Delta y$	$F=-15$	9	2	0
4	$F=-15<0$	$+\Delta y$	$F=-10$	9	3	0
5	$F=-10<0$	$+\Delta y$	$F=-3$	9	4	0
6	$F=-3<0$	$+\Delta y$	$F=6$	9	5	0
7	$F=6\geqslant 0$	$-\Delta x$	$F=-11$	8	5	8
8	$F=-11<0$	$+\Delta y$	$F=0$	8	6	0
9	$F=0\geqslant 0$	$-\Delta x$	$F=-15$	7	6	7
10	$F=-15<0$	$+\Delta y$	$F=-2$	7	7	0
11	$F=-2<0$	$+\Delta y$	$F=13$	7	8	0
12	$F=13\geqslant 0$	$-\Delta x$	$F=0$	6	8	6
13	$F=0\geqslant 0$	$-\Delta x$	$F=-11$	5	8	5
14	$F=-11<0$	$+\Delta y$	$F=6$	5	9	0
15	$F=6\geqslant 0$	$-\Delta x$	$F=-3$	4	9	4
16	$F=-3<0$	$+\Delta y$	$F=16$	4	10	0
17	$F=16\geqslant 0$	$-\Delta x$	$F=9$	3	10	3
18	$F=9\geqslant 0$	$-\Delta x$	$F=4$	2	10	2
19	$F=4\geqslant 0$	$-\Delta x$	$F=1$	1	10	1
20	$F=1\geqslant 0$	$-\Delta x$	$F=0$	0	10	0

2）双判别进给法插补圆弧　在图 3.3-17b 中，区间 N1 内，初始值 $F_m=0$，$x_m=10$，$y_m=0$，$J=20$；计算过程见表 3.3-6a。

表 3.3-6a 圆弧双判别进给法计算过程

进给次数	偏差计算 $F_{m1}=F_m+2y_m+1$ $F_{m2}=F_{m1}-2x_m+1$	偏差判别	进给	x_m	y_m	J
1	$F_{m1}=1, F_{m2}=-18$	$\lvert F_{m2}\rvert>\lvert F_{m1}\rvert, F_m=1$	Δy	10	1	19
2	$F_{m1}=4, F_{m2}=-15$	$\lvert F_{m2}\rvert>\lvert F_{m1}\rvert, F_m=4$	Δy	10	2	18
3	$F_{m1}=9, F_{m2}=-10$	$\lvert F_{m2}\rvert>\lvert F_{m1}\rvert, F_m=9$	Δy	10	3	17
4	$F_{m1}=16, F_{m2}=-3$	$\lvert F_{m2}\rvert<\lvert F_{m1}\rvert, F_m=-3$	$\Delta y, \Delta x$	9	4	15
5	$F_{m1}=6, F_{m2}=-11$	$\lvert F_{m2}\rvert>\lvert F_{m1}\rvert, F_m=6$	Δy	9	5	14
6	$F_{m1}=17, F_{m2}=0$	$\lvert F_{m2}\rvert<\lvert F_{m1}\rvert, F_m=0$	$\Delta y, \Delta x$	8	6	12
7	$F_{m1}=13, F_{m2}=-2$	$\lvert F_{m2}\rvert>\lvert F_{m1}\rvert, F_m=-2$	$\Delta y, \Delta x$	7	7	10

在图 3.3-17b 中，区间 N2 内，初始值 $F_m=-4$，$x_m=7$，$y_m=7$，$J=10$。计算过程见表 3.3-6b。

表 3.3-6b 圆弧双判别进给法计算过程

进给次数	偏差计算 $F_{m1}=F_m-2x_m+1$ $F_{m2}=F_{m1}+2y_m+1$	偏差判别	进给	x_m	y_m	J
8	$F_{m1}=13, F_{m2}=0$	$\lvert F_{m2}\rvert<\lvert F_{m1}\rvert, F_m=0$	$\Delta y, \Delta x$	6	8	8
9	$F_{m1}=13, F_{m2}=-2$	$\lvert F_{m2}\rvert>\lvert F_{m1}\rvert, F_m=-2$	$\Delta y, \Delta x$	5	9	6
10	$F_{m1}=9, F_{m2}=-8$	$\lvert F_{m2}\rvert<\lvert F_{m1}\rvert, F_m=-8$	$\Delta y, \Delta x$	4	10	4
11	$F_{m1}=1, F_{m2}=-18$	$\lvert F_{m2}\rvert>\lvert F_{m1}\rvert, F_m=1$	Δx	3	10	3
12	$F_{m1}=8, F_{m2}=-11$	$\lvert F_{m2}\rvert>\lvert F_{m1}\rvert, F_m=8$	Δx	2	10	2
13	$F_{m1}=-3, F_{m2}=18$	$\lvert F_{m2}\rvert>\lvert F_{m1}\rvert, F_m=-3$	Δx	1	10	1
14	$F_{m1}=-4, F_{m2}=17$	$\lvert F_{m2}\rvert>\lvert F_{m1}\rvert, F_m=-4$	Δx	0	10	0

2 锥度加工原理

2.1 控制基本原理

锥度加工方法，就其机床结构上来分，有摆动或单臂移动式、双臂移动式等等，目前国内使用较多是单臂式移动结构，即四维直角空间结构（图 3.3-18），这里以此来分析锥度加工原理。

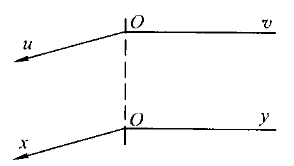


图 3.3-18 四维直角空间结构

切割工件的电极丝固定在床身的线架上，由上下二导轮支承着，步进电机带动工作台上的工件作 x 轴、y 轴方向移动，形成工件和电极丝作对相对运动，实现平动切割。

为讨论方便，可以认为工件是静止的，电极丝相对工件运动。编程序时，线圆运动方向可认为电极丝作平动运动。

在带有锥度切割功能线切割机床上，上线架顶端有二块可在水平方向上作相互垂直运动的滑板，由它来移动电极丝的上端作以电极丝下端为支点的电极丝倾斜运动，由电极丝平动和电极丝倾斜运动，按一定方式合成构成锥度运动。

如图 3.3-19 所示，先使电极丝倾斜一定角度（使 AA' 移至 AA_1）然后电极丝在 O' 平面内的点 A_1 相对电极丝下端在 O 平面内的 A 点走一个圆，在空间形成了以电极丝轨迹为母

线的圆锥，呈尖锥状，如果此时，整个线架（电极丝）同时又作相对工件走圆（实际为 x、y 滑板走圆），只要满足这二个走圆同步，则能叠加出一个如图 3.3-20 所示的圆锥体。

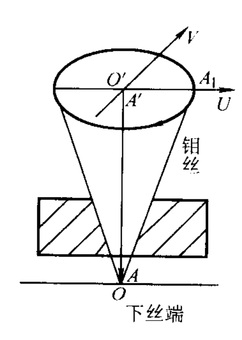


图 3.3-19　线架走圆示意图

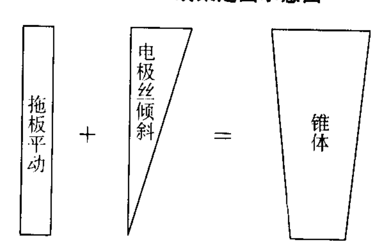


图 3.3-20　锥体成形示意图

当线架相对于工件走圆的顺逆方向（电极丝平动）与线架上端走圆顺逆方向（电极丝倾斜）一致且相位差为 0 时，则能切割出倒锥体。当线架电极丝平动走圆顺逆方向与电极丝倾斜走圆顺逆方向一致，但相位差为 180°，则能切割出正锥体，图 3.3-21 表示线架相对工件走圆方向，以及从第二象限起始。所以锥度加工基本原理应是电极丝平动和倾斜轨迹叠加，小滑板 u、v 轴运动方向与大滑板 x、y 轴带动电极丝运动方向一致时，得到的是上大下小锥体。运动方向不一致时为上小下大锥体。

倒锥体	顺锥体

图 3.3-21　线架平面相对工件方向运动情况

2.2　顺倒锥度加工

（1）锥度加工

位移 L' 产生上述的锥度加工基本原理是基于电极丝平动（xy 平面）和电极丝倾斜（uv 平面）联动来完成倒顺锥体加工，这仅仅在原理上简述切割的可行性，只考虑电极丝平动（以 R 为半径直体圆）和电极丝倾斜（电极丝上顶端挠下支点）位置运动，是无法加工出符合图纸尺寸要求的锥度件的。这是因为工件安置在电极丝上下端点之间内任一水平位置上（参见图 3.3-22），安置位置不同，使加工后尺寸也不同，如何使下支点 O 移到工件一端面上，利用平移产生轨迹，可理解相当于下支点移到端面上。确保工件获得规定的锥体形状，应从量的概念上，着手处理锥度加工，为此须引进锥度加工 α、H、h 三要素。

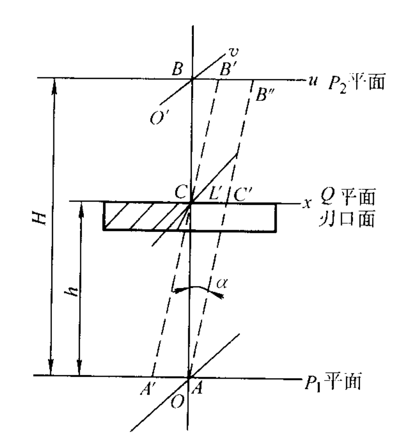


图 3.3-22　锥度加工原理

α 为需要加工锥度单面斜度，一般从图纸上标出和需求者提供。

H 为电极丝上下二点之间（上下二导轮中心距）距离，一旦线架高度设定，H 为常量。

h 为下导轮中心到工件图形面（刃口面）的距离。

α、H、h 的位置见图 3.3-22。P_1 平面位于电极丝下端点，P_2 平面位于电极丝上端点距下支点距离为 H，Q 平面位于刃口型腔面，距下支点距离为 h。

为讨论方便，将二导轮中心点看成是 A、B 二端点，电极丝过刃口面平面的点为 C 点，A、C、B 均是初始位置，电极丝重合于 OO'，且为 P_1、P_2、Q 三个平面上点。

如果要得到以 C 为支点在工件面上产生一个尖圆锥体应采用运动叠加来解决。当电极丝倾斜了一个 α 角，在上端 P_2 平面上电极丝以初始 B 点移至 B'' 点上，在 P_2 平面上移动了 l 进给量，由于 Q 平面位于下支点高度 h，造成 Q 平面内 C 点移至 C' 点上，产生位移 L'，且方向与 P_2 平面中 l 进给量相同。

（2）电极丝原点倾斜方法

要使在 Q 平面内不产生 L' 的位移，使 C 点维持在原位置上不动，又要达到预期倾斜 α 角目的，必须设法在作 l 进给量运动时，电极丝平移 L 量使它大小相等于 L' 而方向异于 L'，才能抵消 l 进给量移动造成 Q 平面内产生位移量 L'。P_1 平面内 L 平移，可看成电极丝下支点 A 点移到 A' 点，电极丝在 P_1、P_2、Q 平面上最终位置落在 A'、C、B' 点上，满足了原点倾斜的位置需要，在运动过程中，注意到小滑板移动电极丝倾斜产生 l 进给量移动和电极丝平动 L 移动量，按比例法进行插补进给，可有效保证电极丝在 Q 平面 C 点不动，也不产生 Q 平面上 L' 位移，插补时在 C 点有不大于 $\pm 1\mu m$ 位移痕迹。当高度为 H 时，电极丝倾斜 α 角度时，在上线架产生倾斜量 l，应为：

$$l = H\tan\alpha \tag{3.3-10}$$

$$L = h\tan\alpha \tag{3.3-11}$$

倾斜量 L 抵消在 Q 平面产生的位移量 L'。

电极丝以原始位置倾斜 α 角到达切割尖锥体起始位置 B' 点上，此时 P_2 平面内以 l 为半径从起始点 B' 作圆周运动（小滑板 u、v 轴滑动电极丝）和电极丝以 L 为半径且方位差 180°作圆周运动（平动）就可在工件的刃口面上得到尖圆锥体。相当于把下支点移到刃口面上。

（3）倒锥体获得

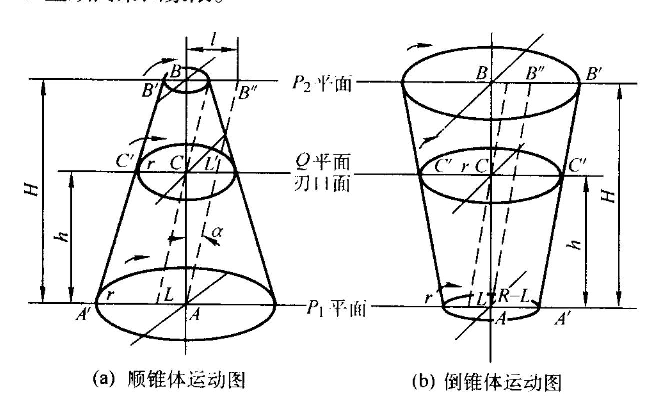
1）顺锥体加工获得如图 3.3-23a 工件。已知 Q 平面图形半径 r，$l = H\tan\alpha$，运动方向与 r 相反，P_2 平面上则以

$R_2 = r + L - l$ 为半径作圆周运动。$L = h\tan\alpha$ 抵消偏移 L' 量，在 P_1 平面内以 $R_1 = r + L$ 为半径作圆圆运动，当 P_1、P_2 平面各自以 R_1 和 R_2 为半径运动时，电极丝运动轨迹与顺锥工件的母线重合。特别强调：P_2（上顶端）平面是（$R + L$）电极丝平动和 L 电极丝顶点运动（使电极丝倾斜）叠加要用二个平面联动插补来处理，运作过程中，我们观察到 P_2 端是以 R_2 为半径的圆周运动，Q 平面则是以 r 为半径的圆周运动，P_1 是（$R + L$）为半径的圆周运动。

2）锥体加工获得如图 3.3-23b，倒锥体加工原理分析类似顺锥体原理分析，仅注意到倾斜半径 l，运动方向与 r 运动顺逆方向一样，但相位差为 0°，L 偏移量方向与 r 量反相。有：

$$R_1 = R - L \qquad R_2 = l + (R - L)$$

在 Q 平面内保持图形 r 为半径圆周，初始位置在 A'、B'、C' 上顺圆第四象限。



(a) 顺锥体运动图　　(b) 倒锥体运动图

图 3.3-23　锥度形成原理

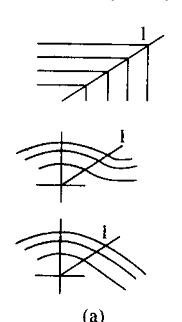
顺倒锥计算见表 3.3-7。

表 3.3-7　顺倒锥计算

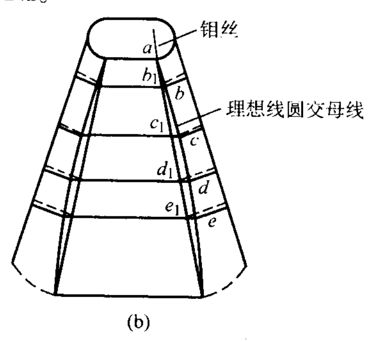
	顺锥体	倒锥体
$l = H\tan\alpha \quad L = h\tan\alpha$		
P_1 平面平动	$R_1 = R + L$	$R_1 = R - L$
P_2 平面平动 + 倾斜	$R_2 = (R + L) - l$	$R_2 = (R - L) + l$
Q 平面图纸中半径	r	r

（4）锥度计算应注意的问题

在分析锥度加工原理时，切割的锥度件上下二端图形应满足等距扩大（缩小）。因为在叙述锥度原理是基于线线交、线圆切、圆圆切三种图形的基础上的，如图 3.3-24a，一系列等距线是这类图形斜度件，各层横切面的图形在底部的投影轨迹。连接各接点成直线，易知与电极丝是吻合的。但是在线圆相交、圆圆相交时，连接各横切面的线圆、圆圆交点就不是直线。见图 3.3-24b。



(a)



(b)

图 3.3-24　各线段交点示意图

1）线圆相交投影轨迹计算　线圆相交各横截面的交点在底部投影轨迹计算（参见图 3.3-25）：

$$\begin{cases} y = b + k & (3.3\text{-}12) \\ R = r + k & (3.3\text{-}13) \end{cases}$$

$$x^2 + y^2 = R^2 = (r + k)^2$$

$$x^2 + y^2 = [r + (y - b)]^2$$

$$x^2 + y^2 = r^2 + y^2 + b^2 + 2ry - 2by - 2rb \qquad (3.3\text{-}14)$$

$$x^2 = 2(r - b)y + r^2 - 2rb + b^2$$

$$x^2 = 2py + p^2$$

这里，$p = r - b$；(a，b) 初始线圆交点坐标值；(x，y) 等距扩大后线圆的交点在底面上的投影。由式（3.3-14）知连接各投影交点产生线型为抛物线，若要圆形各切面等距，必须过 b、c、d、e……是一曲线，电极丝线是直线，它不可能为曲线，只能过 b、c、d、e，…，n，造成了锥体各横切面直线间投影和圆弧间投影是不等距的。

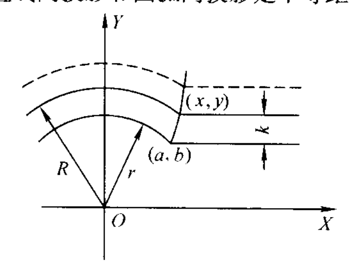


图 3.3-25　线圆相交各横切面投影图

2）圆圆相交各横切面在底部投影轨迹计算（参见图 3.3-26）　已知 R_1、R_2、θ，圆心 O_1 为原点，R_1、R_2 扩大等值长 k，两圆交点 O 点，求 O 的轨迹。O 点坐标（x，y）满足方程：

$$\begin{cases} x^2 + y^2 = (R_1 + k)^2 & (3.3\text{-}15) \\ (x - d)^2 + y^2 (R_2 + k)^2 & (3.3\text{-}16) \end{cases}$$

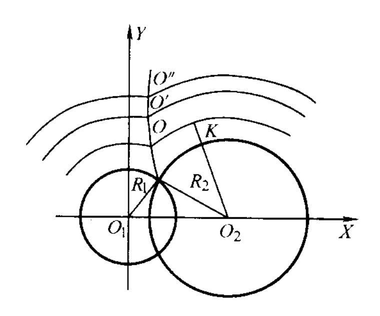


图 3.3-26　圆圆相交各横切面在底部投影轨迹

由式（3.3-15）和式（3.3-16）得

$$2dx - d^2 = R_2^1 - R_2^2 + 2(R_1 - R_2)k \qquad (3.3\text{-}17)$$

当 $R_1 = R_2$ 时，轨迹 $x = \dfrac{d}{2}$

$R_1 \neq R_2$ 时，由式（3.3-17）得

$$k = \frac{dx}{R_1 - R_2} - \frac{d^2 + R_1^2 - R_2^2}{2(R_1 - R_2)} \qquad (3.3\text{-}18)$$

将 K 代入式（3.3-15）得

$$x^2 + y^2 = (R_1 + k)^2 = \left[R_1 - \frac{d^2 + R_1^2 - R_2^2}{2(R_1 - R_2)} + \frac{d}{R_1 - R_2} x \right]^2$$

令常数项

$$A = R_1 - \frac{d^2 + R^2 - R_2^2}{2(R_1 - R_2^2)}$$

$$B = \frac{d}{R_1 - R_2}$$



则有

$$x^2+y^2=(A+Bx)^2$$

$$x^2+y^2=A^2+2ABx+B^2x^2(B^2-1)x^2+2ABx-y^2$$

$$=-A^2(B^2-1)\left(x^2+\frac{AB}{B^2-1}\right)-y^2=\frac{A^2B^2}{B^2-1}-A^2 \tag{3.3-19}$$

三角形 $d^2>(R_1-R_2)^2, B=\frac{d}{R_1-R_2}(B^2>1)$

$$\left(x+\frac{AB}{B^2-1}\right)^2-\frac{y^2}{(B^2-1)}=\frac{A^2}{B^2-1}(B^2-1>0) \tag{3.3-20}$$

轨迹方程为双曲线，焦点坐标$\left(\frac{AB}{1-B^2},\ 0\right)$

结论：$R_1=R_2$ 交点轨迹为直线。

$R_1\neq R_2$ 交点轨迹为双曲线。

同样圆圆交，其各横切面交点投影为双曲线，可见此类斜度件各层横切面的交点的连线同样不可能为直线，因而直接影响到切割精度。

对于圆圆交、线圆交图形为了确保切割斜度精度，应该在作图或切割编程时用小 r 光滑过渡使相交类型改成相切类型，方可有效保证切割斜度的精度。

2.3 锥度加工插补方法

锥度加工必须引进 H、h、α 三要素，控制上线架 u 轴 v 轴和电极丝（大滑板 x 轴 y 轴）运动，是锥度加工的关键，如何进行二平面联动插补，方法较多，这里介绍二种常用的插补方法。需说明的是：以下 R 是指图形中圆的半径或线的 R_m 模拟半径；间隙补偿量；抵消锥度加工产生的端面偏移量 L 之和。叠加时须注意这些量的符号。

（1）角度跟随法

线架相对于工件走圆（实为滑板走圆），可以想像在 xOy 直角坐标系内 M（x，y）沿半径 R 作圆周运动，线架上端走圆在 uOv 直角坐标系内 M（u，v）沿半径 L 作圆周运动，如图 3.3-27 所示。

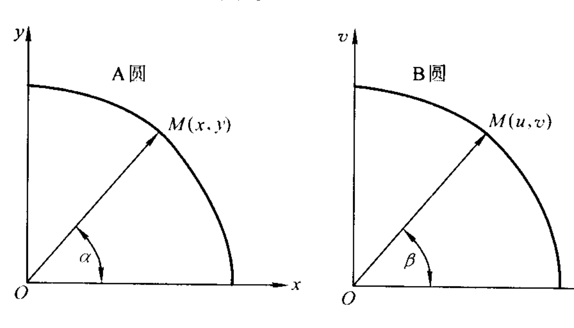


图 3.3-27 角度跟随法

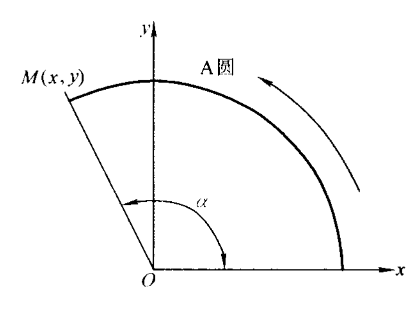
为了切割锥度，M、m 点的走圆运动必须同步。若 M、m 的运动起点都在各自的横坐标轴上，角 α 角 β 在 M、m 运动过程中必须保持相等。要保持角 α 和角 β 相等，就要比较它们的大小，当 $\alpha>\beta$，就要控制 m 沿圆周进一步从而跟上较大的角。反之就要控制 M 沿圆周进一步，这样不断地比较二角大小，根据比较结果控制 M、m 进一步，从而使 α 和 β 始终保持相互跟随。

1）角度偏差判别函数

① NR1 角度偏差公式　如图 3.3-28 所示，在同一象限内比较二角大小，可以把二角分别取正，然后相减，即：

$$\tan\beta-\tan\alpha=\frac{u}{v}-\frac{y}{x}=\frac{xv-uy}{ux} \tag{3.3-21}$$

式中 x、y、u、v 坐标值均取坐标原点为基点的绝对值，因



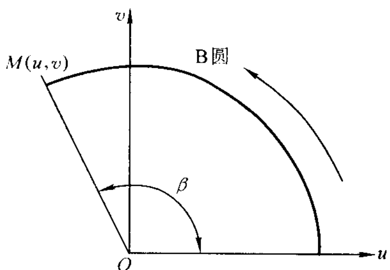


图 3.3-28 NR1 角度偏差公式

为 u、x 总为正值，所以得 NR1 联系函数

$$S=xv-uy \tag{3.3-22}$$

判别 S 符号。若 $S\geqslant0$，则$\angle\beta\geqslant\angle\alpha$，这时应使甲圆走一步；若 $S<0$，则$\angle\beta<\angle\alpha$，这时使乙圆走一步。由于直接计算 $xv-uy$ 较麻烦，可采用函点递推法。

设甲圆 x_n 朝圆内走一趟，则 $x_{n+1}=x_n$，由式（3.3-22）得

$$S_{n+1}=(x_n-1)v_n-u_ny_n=x_nv_n-v_n-u_ny_n=S_n-v_n$$

设甲圆 y_n 朝圆外走一步，则 $x_{n+1}=x_n-1$，由式（3.3-22）得

$$S_{n+1}=x_nv_n-u_n(y_n+1)=x_nv_n-u_ny_n-u_n=S_n-u_n$$

设乙圆 u_n 朝圆内方向走一步，则 $u_{n+1}=u_n-1$，由式（3.3-22）得

$$S_{n+1}=x_nv_n-(u_n-1)y_n=S_n+y_n$$

设乙圆 v_n 朝圆外方向走一步，则 $v_{n+1}=v_n+1$，由式（3.3-22）得

$$S_{n+1}=x_n(v_n+1)-u_ny_n=x_nv_n+x_n-u_ny_n=S_n+x_n$$

对 NR1（第一象限内逆圆），有角度偏差公式：

x 走一步　　$S_{n+1}=S_n-v_n$

y 走一步　　$S_{n+1}=S_n-u_n$

u 走一步　　$S_{n+1}=S_n+y_n$

v 走一步　　$S_{n+1}=S_n+x_n$

② NR2 角度偏差公式

$$\tan\beta-\tan\alpha=-\tan(180°-\beta)-[-\tan(180°-\alpha)]$$

$$=-\frac{v}{u}-\left(-\frac{y}{x}\right)=\frac{y}{x}-\frac{v}{u}$$

$$=\frac{uy-xv}{ux}$$

式中，x、y、u、v 均取绝对值，略去共同正分母 ux，则得到 NR2 的圆圆联系函数：

$$S=uy-xv \tag{3.3-23}$$

式（3.3-22）与式（3.3-23）相比，不同之处仅在于 uy、xv 的正负符号改变了。

甲、乙圆弧均为 NR2。设甲圆 x_n 朝圆外方向走一步，则 $x_{n+1}=x_n+1$，由式（3.3-23）得

$$S_{n+1}=u_ny_n-(x_n+1)v_n=u_ny_n-x_nv_n-v_n=s_n-v_n$$

设甲圆 y_n 朝圆内方向走一步，则 $y_{n+1}=y_n-1$，由式

(3.3-23) 得

$$S_{n+1}=u_n(y_n-1)-x_nv_n=u_nv_n-u_n-x_nv_n=s_n-u_n$$

设乙圆 u_n 朝圆外方向走一步，则 $u_{n+1}=u_n+1$，由式(3.3-23) 得

$$S_{n+1}=(u_n-1)y_n-x_nv_n=u_ny_n+y_n-x_nv_n=s_n+y_n$$

设乙圆 v_n 朝圆内方向走一步，则 $v_{n+1}=v_n-1$，由式(3.3-23) 得

$$S_{n+1}=u_ny_n-x_n(v_n-1)=u_ny_n-x_nv_n+x_n=S_n+x_n$$

故在Ⅱ象限中的逆圆和在Ⅰ象限中逆圆的角度偏差判别公式相同。

可用类似的方法推导出 NR_3、NR_3、SR_1、SR_2、SR_3、SR_4 的角度偏差判别公式，见表 3.3-8。

表 3.3-8 NR_{1-4}、SR_{1-4}的递推式

圆弧种类	圆圆联系函数	进给	递推式
NR_1，NR_3	$xv-uy$	x	$S-v\Rightarrow S$
SR_2，SR_4		y	$S-u\Rightarrow S$
NR_2，NR_4	$uy-xv$	u	$S+y\Rightarrow S$
SR_1，SR_3		v	$S+x\Rightarrow S$

2) A、B圆弧的自身插补偏差值　根据 A、B 圆弧之间联系函数 S 的正负符号就可判断出下一步是走 A 圆还是走 B 圆。下面的问题是由谁来判定走 A 圆中的 x 或 y 还是走 B 圆中的 u 或 v。这就是它们自身作插补运算时的偏差值。根据甲圆所对应的圆弧插补偏差值 P 的正负符号可判定走 x 或 y，根据 B 圆所对应的圆弧插补偏差值 Q 的正负符号可判定走 u 或 v，这是属于在一个直角坐标系统里的圆弧插补问题或称单坐标圆弧插补。

双坐标联动正是采用了 x、y、P 和 u、v、Q 两套单坐标圆弧插补系统，取出它们之间的联系函数 S，设计出新的算法程序，做到双圆弧插补过程中的相互依存，相互制约，从而达到步步跟踪的目的。

现以 NR1 中的 A、B 圆（见图 3.3-28）为例进行说明如下：

若 $S\geqslant0$ 时，则走 A 圆。当 $P\geqslant0$ 时，则走 A 圆中的 x（即 x 向圆内进给一步）。当 $P<0$ 时，则走 A 圆中的 y（即 y 向圆外进给一步）。

若 $S<0$ 时，则走 B 圆。当 $Q\geqslant0$ 时，则走 B 圆中的 u（即 u 向圆内进给一步）。当 $Q<0$ 时，则走 B 圆中的 v（即 v 向圆外进给一步）。

每进给一步，由计算机算出新的 S、P、Q 值，以决定下一步走谁，现将其列于表 3.3-9 中。

表 3.3-9 NR_1、NR_3、SR_2、SR_4 的插补偏差值

SR_2，SR_4，NR_1，NR_3	$S\geqslant0$（走 A 圆）		$S<0$（走 B 圆）	
	$P\geqslant0$	$P<0$	$Q\geqslant0$	$Q<0$
计算	$P-2x+1\to P$ $x-1\to x$ $S-v\to S$ $v\to v$	$P+2y+1\to P$ $y+1\to y$ $S-v\to S$ $u\to u$	$Q-2u+1\to Q$ $u-1\to u$ $S+y\to S$ $y\to y$	$Q+2v+1\to Q$ $v+1\to v$ $S+x\to S$ $x\to x$
进给	Δx	Δy	Δu	Δv

表中，箭头右边的 x、y、P、S、u、v、Q 代表进给后加工点的坐标值和偏差值，箭头左边的 x、y、P、S、u、v、Q 代表进给前加工点的坐标值和偏差值。

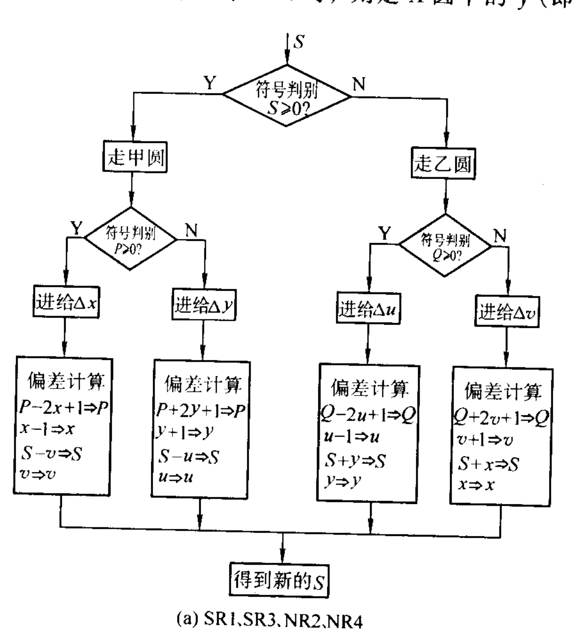
经进一步推导，还可发现 NR_3、SR_2、SR_4 的运算表和 NR_1 完全一样，见表 3.3-10。

表 3.3-10 NR_2、NR_4、SR_1、SR_3 的插补偏差值

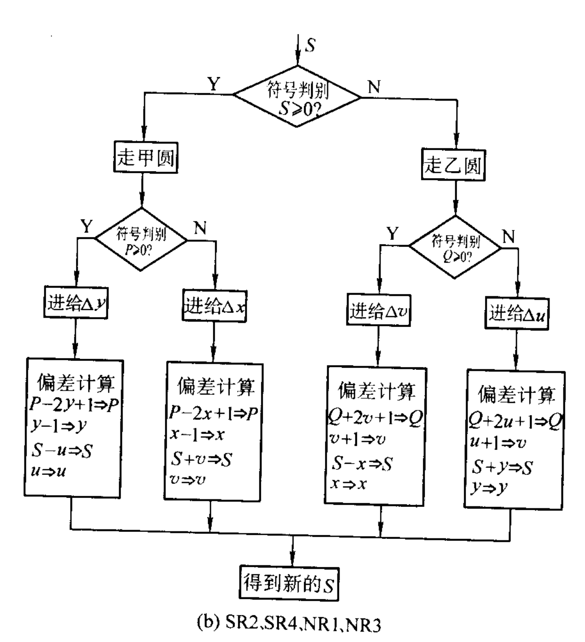
SR_1，SR_3，NR_2，NR_4	$S\geqslant0$（走甲圆）		$S<0$（走乙圆）	
	$P\geqslant0$	$P<0$	$Q\geqslant0$	$Q<0$
计算	$P-2y+1\to P$ $y-1\to y$ $S-u\to S$ $u\to u$	$P+2x+1\to P$ $x+1\to x$ $S-v\to S$ $v\to v$	$Q-2v+1\to Q$ $v-1\to v$ $S+x\to S$ $x\to x$	$Q+2u+1\to Q$ $u+1\to u$ $S+y\to S$ $y\to y$
进给	Δy	Δx	Δv	Δu

图 3.3-29 给出了表 3.3-9 和表 3.3-10 的插补运算的程序框图。

例： 设 A 圆起点 A 的坐标为 (5，0)，B 圆 a 的坐标为 (4，0)，逆时针方向运动，由表 3.3-11 偏差运算计算可看出圆弧 AB 和圆弧 ab 间作双坐标联动的全过程，如图 3.3-30 所示。



(a) SR1、SR3、NR2、NR4



(b) SR2、SR4、NR1、NR3

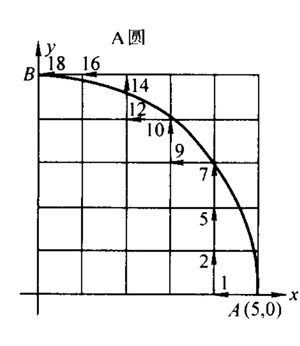
图 3.3-29 加工圆弧作双坐标联动过程



表 3.3-11　圆弧角度跟随法插补进给与偏差计算

步序	角度偏差判别 F	决定走向	判别 P、Q	决定走向	新的偏差及坐标值运算						
					F	P	Q	x	y	u	v
0					0	0	0	5	0	4	0
1	$F\geqslant0$	A	$P\geqslant0$	Δx	$F=F-v$ $F=0-0=0$	$P=P-2x+1$ $P=0-10+1=-9$		4	0	4	0
2	$F\geqslant0$	A	$P<0$	Δy	$F=F-u$ $F=0-4=-4$	$P=P+2y+1$ $P=-9+0+1=-8$		4	1	4	0
3	$F<0$	B	$Q\geqslant0$	Δu	$F=F+y$ $F=-4+1=-3$		$Q=Q-2u+1$ $Q=0-8+1=-7$	4	1	3	0
4	$F<0$	B	$Q<0$	Δv	$F=F+x$ $F=-3+4=1$	$Q=Q+2v+1$ $Q=-7+0+1=-6$	4	1	3	1	1
5	$F\geqslant0$	A	$P<0$	Δy	$F=F-u$ $F=1-3=-2$	$P=P+2y+1$ $P=-8+2+1=-5$		4	2	3	1
6	$F<0$	B	$Q<0$	Δv	$F=F+x$ $F=-2+4=2$		$Q=Q+2v+1$ $Q=-6+2+1=3$	4	2	3	2
7	$F\geqslant0$	A	$P<0$	Δy	$F=F-u$ $F=2-3=-1$	$P=P+2y+1$ $P=-5+4+1=0$		4	3	3	2
8	$F<0$	B	$Q<0$	Δv	$F=F+x$ $F=-1+4=3$		$Q=Q+2v+1$ $Q=-3+4+1=2$	4	3	3	3
9	$F\geqslant0$	A	$P\geqslant0$	Δx	$F=F-u$ $F=3-3=0$	$P=P-2x+1$ $P=0-8+1=-7$		3	3	3	3
10	$F\geqslant0$	A	$P\geqslant0$	Δy	$F=F-u$ $F=0-3=-3$	$P=P+2y+1$ $P=-7+6+1=0$		3	4	3	3
11	$F<0$	B	$Q\geqslant0$	Δu	$F=F+y$ $F=-3+4=1$		$Q=Q-2u+1$ $Q=2-6+1=-3$	3	4	2	3
12	$F\geqslant0$	A	$P\geqslant0$	Δx	$F=F-v$ $F=1-3=-2$	$P=P-2x+1$ $P=0-6+1=-5$		2	4	2	3
13	$F<0$	B	$Q<0$	Δv	$F=F+x$ $F=-2+2=0$		$Q=Q+2v+1$ $Q=-3+6+1=4$	2	4	2	4
14	$F\geqslant0$	A	$P<0$	Δy	$F=F-u$ $F=0-2=-2$	$P=P+2y+1$ $P=-5+8+1=4$		2	5	2	4
15	$F<0$	B	$Q\geqslant0$	Δu	$F=F+y$ $F=-2+5=3$		$Q=Q-2u+1$ $Q=4-4+1=1$	2	5	1	4
16	$F\geqslant0$	A	$P\geqslant0$	Δx	$F=F-v$ $F=3-4=-1$	$P=P-2x+1$ $P=4-4+1=1$		1	5	1	4
17	$F<0$	B	$Q\geqslant0$	Δu	$F=F+y$ $F=-1+5=4$		$Q=Q-2u+1$ $Q=1-2+1=0$	1	5	0	4
18	$F\geqslant0$	A	$P\geqslant0$	Δx	$F=F-v$ $F=4-4=0$	$P=P-2x+1$ $P=1-2+1=0$		0	5	0	4

注：A 圆进给偏差判别式为 P；B 圆进给偏差判别式为 Q；角度偏差函数式为 F。



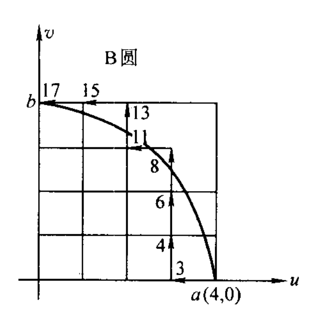


图 3.3-30 *AB* 和 *ab* 间作双坐标联动全过程

(2) $R-l$ 比例法插补原理

以往用一套逐点比较法插补获得相应轴上的进给量和偏差运算，再通过该进给轴所对应的另一平面中相对应的轴，用比例法插补函数判是否应执行另一个平面中的相对应轴的进给量，这种设想和做法，误差较大，现已废弃。

1）圆弧比例联动函数推导

① 采用二套逐点比较法，各自对线架和滑板进行进给插补用 $R-l$ 比例插补函数来判定当前应进给和插补是线架的 x 轴或 y 轴还是进给和插补小滑板上 u 轴或 v 轴（参见图 3.3-31）。

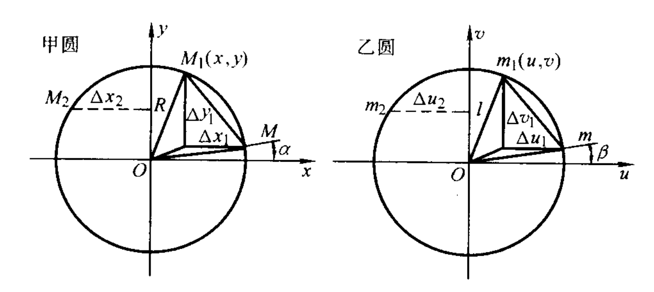


图 3.3-31 $R-l$ 比例法插补

甲圆：为线架（xOy）平面，M 为起点在第一象限逆向运行到 M（x，y）即时点上。

乙圆：为小滑板 u、v 线架在 uOv 平面内，m 为起点在第一象限逆向运行至 m_1（u，v）。

起始点 M 与 x 轴交角 α 等于 m 点与 u 轴交角 β，圆弧 MM_1 在 y 轴上投影 Δy_1，x 轴上投影 Δx_1，圆弧 mm_1 在 u 轴投影 Δu_1，在 v 轴的投影 Δv_1，OM 半径为 R。Om 半径为 l。OM_1 与 x 轴交角等于 OM_1 与 u 轴相交角：

$$\frac{R}{l}=\frac{\Delta x_1}{\Delta u_1}=\frac{\Delta y_1}{\Delta v_1} \tag{3.3-24}$$

$$\frac{\Delta y_1}{\Delta x_1}=\frac{\Delta v_1}{\Delta u_1} \tag{3.3-25}$$

$$\frac{\Delta y_1+\Delta x_1}{\Delta u_1+\Delta v_1}=\frac{\Delta x_1}{\Delta u_1}=\frac{\Delta y_1}{\Delta x_1} \tag{3.3-26}$$

由式（3.3-24）和式（3.3-25）知

$$\frac{R}{l}=\frac{\Delta y_1+\Delta x_1}{\Delta u_1+\Delta v_1} \tag{3.3-27}$$

式（3.3-27）中（$\Delta y+\Delta x$）是 M 点运动时在 x 轴和 y 轴上进给量总和（绝对值），（$\Delta u+\Delta x$）是 M 点运动时在 u 轴和 v 轴上进给量总和（绝对值）。由式（3.3-27）整理得 $R-l$ 二平面坐标系联动比例插函数 G。

$$G=R(\Delta u_1+\Delta v_1)-l(\Delta x_1+\Delta y_1) \tag{3.3-28}$$

因直接计算 $G=R(\Delta u_1+\Delta v_1)-l(\Delta x_1+\Delta y_1)$ 比较麻烦，采用递推法则较为方便。见递推法求 G 比例插补函数。

以上讨论在第一象限比例插补情况，圆弧跨第一、二象限得：

Δy_2，Δx_2，Δu_2，Δv_2 分别为第二象限各分轴投影量。

$$\frac{R}{l}=\frac{\Delta y_1+\Delta x_2}{\Delta u_2+\Delta v_2} \tag{3.3-29}$$

根据式（3.3-27）和式（3.3-29）得

$$\frac{\Delta x_1+\Delta y_2}{\Delta u_2+\Delta v_2}=\frac{\Delta x_1+\Delta y_1}{\Delta u_1+\Delta v_1}$$

$$\frac{(\Delta x_1+\Delta y_1)+(\Delta x_2+\Delta y_2)}{(\Delta u_1+\Delta v_1)+(\Delta u_2+\Delta v_2)}=\frac{\Delta y_2+\Delta x_2}{\Delta u_2+\Delta b_2}=\frac{R}{l}$$

$$G=(\Delta u_1+\Delta v_1+\Delta u_2+\Delta v_2)\times R-(\Delta x_1+\Delta y_1+\Delta x_2+\Delta y_2)\times l \tag{3.3-30}$$

圆弧跨多个象限算法依次推得：

$$G=[\sum(\Delta u+\Delta v)]\times R-[\sum(\Delta x+\Delta y)]\times l$$

$\sum(\Delta u+\Delta v)$，$\sum(\Delta x+\Delta y)$ 分别为 uv 平面、xy 平面上各自运动时在数轴上投影的积累（可以跨象限累计）：

$$\sum(\Delta u+\Delta v)=\Delta U_1+\Delta v_1+\Delta U_2+\Delta v_2+\cdots+\Delta U_i+\Delta v_i=\delta_i$$

$$\sum(\Delta x+\Delta y)=\Delta x_1+\Delta y_1+\Delta x_2+\Delta y_2+\cdots+\Delta x_i+\Delta y_i=\Delta_i$$

$R-l$ 比例偏差运算式

$$G=\delta_i\times R-\Delta_i\times l \tag{3.3-31}$$

② 递减法求 G 比例插补函数　线架和小滑板插补是采用二套各自逐点比较法进行的，在一个坐标系内进给量只能是一根数轴，所以比例插补函数 G 中 δ_i、Δ_i 增量都是加 L 运算。

设：第一套逐点判别式（x，y 轴）为 F_1；

　　第二套逐点判别式（u，v 轴）为 F_2；

当 $G\geqslant 0$　$G_{n+1}=R\delta_i-(\Delta_i+1)=(R\delta_i-\Delta_i)l=G_n+l$

此时应在 x（y）轴实行进给 1 μm 并同时运算 F_1，F_1 为 xy 圆弧插补函数。

当 $G<0$　$G_{n+1}=R(\delta_i+1)-l\Delta_i=(R\delta_i-l\Delta_i)+R=G_n+R$

应在 u 或 v 轴上进给 1 μm 并同时运算 F_2，F_2 为 uv 圆弧插补函数

当 $l>R$ 时，注意应将（u、v 轴）插补作为 F_1，（x、y 轴）插补作为 F_2，此时比例联动函数中 R，l，Δ，δ 等参数对调，保证各自插补联动精度。

2）线比例函数　以上走圆时的比例插补函数，同样也满足走直线时插补。在平面联动比例插补遇到线线交时，线架上顶下底图形如图 3.3-32 所示。

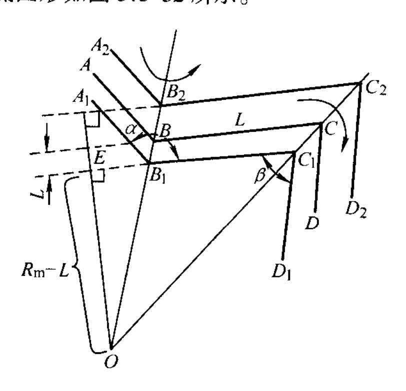


图 3.3-32 上下轨迹应是一对等扩大缩小的图形

在 4B 指令中有 $\pm R_m$ 值作为锥度加工中运算依据之一，也可通过图形计算求得 R_m。

下底线架为电极丝平动轨迹，走向 $A_1\to B_1\to C_1\to D_1$。上顶为极丝平动和线架上端运动合成轨迹，走向 $A_2\to B_2\to C_2\to D_2$，图形由 $A\to B\to C\to D$，讨论图形 BC 走向上顶为



B_2C_2，下底为 B_1C_1，直线 BC 长度为 L，端点 B 的走向 $A\to B\to C$，为逆角走向，C 端点走向是 $B\to C\to D$，为顺角走向。

$$R_m=\frac{L}{f_1\cot\alpha+f_2\cot\beta}\qquad(3.3\text{-}32)$$

例：符号位 $f_1=-1$（B 点为逆角），$f_2=1$（C 端为顺角），则有

$$R_m=\frac{L}{-\cot\alpha+\cot\beta}$$

$R_m>0$ 表示顺角变化大于逆角变化，与顺圆方向相类似。

$R_m<0$ 表示顺角变化小于逆角变化，与逆圆方向相类似。

当 $\alpha=0$，$\beta=0$ 为直线连线无交点。

在正锥时大滑板平动 $R=(R_m+L)$，小滑板半径为 $-l$，进给方向与大滑板相反。倒锥时半径 $R=(R_m-L)$，小滑板半径 l，进给方向与大滑板相同。

按相似比例方法得：$\frac{R}{L}=\frac{\Delta x}{\Delta u}=\frac{\Delta y}{\Delta v}$，算式与走圆相同，所不同的是走圆时 R 是实际圆的半径，走直线时 R 是通过公式求得的模拟半径，所以无论圆和直线，只要符合线圆切，圆圆切，线线交，二平面联动可同用插补函数 G，直线与圆弧比例联动函数完全相同。

圆弧联动比例插补函数：

$$G\geq0\quad G_{n+1}=G_n-l$$

$$G<0\quad G_{n+1}=G_n+R$$

$l=H\tan\alpha$　电极丝倾斜半径；$L=h\tan\alpha$　端面偏移量 L 依据正倒锥符号规定和 R_m 相加为 x、y 轴半径 R。

3）二平面联动比例插补　设锥度加工时下底为半径 $R=5$ mm 的圆，而电极丝的倾斜半径 $l=4$ mm，加工时的 3B 指令为：R5 B5000 B0 B005000 Gx NR1。加工过程中二个平面联动的比例插补运算流程如图 3.3-33 所示，大小滑板插补运算过程如表 3.3-12，而大小滑板实际行动情况如图 3.3-34 所示。

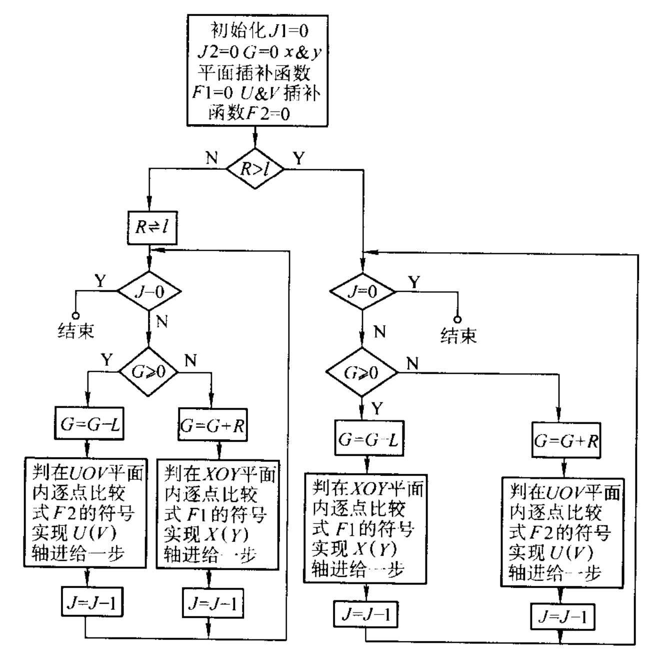


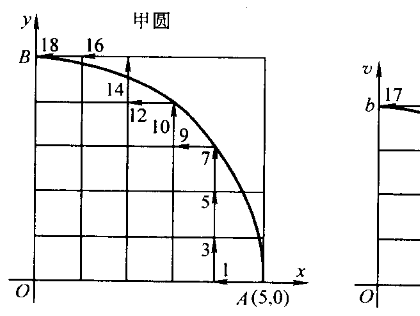
图 3.3-33　二平面联动比例插补运算流程图

表 3.3-12　大小滑板联动插补运算

序号	联动偏差判别	联动偏差计算	联动进给	xy 进给偏差判别	xy 进给	xy 进给偏差计算	uv 进给偏差判别	uv 进给	uv 进给偏差计算
1	$G\geq0$	$G=0-4=-4$	大滑板执行进给和计算	$F_1\geq0$	进给 x	$F_1=F_1-2x+1=0-2\times5+1=-9$ $x=5-1=4$			
2	$G<0$	$G=-4+5=1$	小滑板执行进给和计算	—	—	—	$F_2\geq0$	进给 u	$F_2=F_2-2u+1=0-2\times4+1=-7$ $u=4-1=3$
3	$G\geq0$	$G=1-4=-3$	大滑板执行进给和计算	$F_1<0$	进给 y	$F_1=F_1+2y+1=-9+2\times0+1=-8$ $y=0+1=1$	—	—	—
4	$G<0$	$G=-3+5=2$	小滑板执行进给和计算	—	—	—	$F_2<0$	进给 v	$F_2=F_2+2v+1=-7+2\times0+1=-6$ $v=0+1=1$
5	$G\geq0$	$G=2-4=-2$	大滑板执行进给和计算	$F_1<0$	进给 y	$F_1=F_1+2y+1=-8+2\times1+1=-5$ $y=1+1=2$	—	—	—
6	$G<0$	$G=-2+5=3$	小滑板执行进给和计算	—	—	—	$F_2<0$	进给 v	$F_2=F_2+2v+1=-6+2\times1+1=-3$ $v=1+1=2$
7	$G\geq0$	$G=3-4=-1$	大滑板执行进给和计算	$F_1<0$	进给 y	$F_1=F_1+2y+1=-5+2\times2+1=0$ $y=2+1=3$	—	—	—

续表 3.3-12

序号	联动偏差判别	联动偏差计算	联动进给	xy 进给偏差判别	xy 进给	xy 进给偏差计算	uv 进给偏差判别	uv 进给	uv 进给偏差计算
8	$G<0$	$G=-1+5=4$	小滑板执行进给和计算	—	—	—	$F_2<0$	进给 v	$F_2=F_2+2v+1=$ $-3+2\times2+1=2$ $v=2+1=3$
9	$G\geqslant0$	$G=4-4=0$	大滑板执行进给和计算	$F_1\geqslant0$	进给 x	$F_1=F_1-2x+1=$ $0-2\times4+1=-7$ $x=4-1=3$	—	—	—
10	$G\geqslant0$	$G=0-4=-4$	大滑板执行进给和计算	$F_1<0$	进给 y	$F_1=F_1+2y+1=$ $-7+2\times3+1=0$ $y=3+1=4$	—	—	—
11	$G<0$	$G=-4+5=1$	小滑板执行进给和计算	—	—	—	$F_2\geqslant0$	进给 u	$F_2=F_2-2u+1=$ $2-2\times3+1=-3$ $u=3-1=2$
12	$G\geqslant0$	$G=1-4=-3$	大滑板执行进给和计算	$F_1\geqslant0$	进给 x	$F_1=F_1-2x+1=$ $0-2\times3+1=-5$ $x=3-1=2$	—	—	—
13	$G<0$	$G=-3+5=2$	小滑板执行进给和计算	—	—	—	$F_2<0$	进给 v	$F_2=F_2+2v+1=$ $-3+2\times3+1=4$ $v=3+1=4$
14	$G\geqslant0$	$G=2-4=-2$	大滑板执行进给和计算	$F_1<0$	进给 y	$F_1=F_1+2y+1=$ $-5+2\times4+1=4$ $y=4+1=5$	—	—	—
15	$G<0$	$G=-2+5=3$	小滑板执行进给和计算	—	—	—	$F_2\geqslant0$	进给 u	$F_2=F_2-2u+1=$ $4-2\times2+1=1$ $u=2-1=1$
16	$G\geqslant0$	$G=3-4=-1$	大滑板执行进给和计算	$F_1\geqslant0$	进给 x	$F_1=F_1-2x+1=$ $4-2\times2+1=1$ $x=2-1=1$	—	—	—
17	$G<0$	$G=-1+5=4$	小滑板执行进给和计算	—	—	—	$F_2\geqslant0$	进给 u	$F_2=F_2-2u+1=$ $1-2\times1+1=0$ $u=1-1=0$
18	$G\geqslant0$	$G=4-4=0$	大滑板执行进给和计算	$F_1\geqslant0$	进给 x	$F_1=F_1-2x+1=$ $1-2\times1+1=0$ $x=1-1=0$	—	—	—



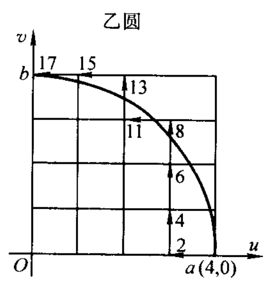


图 3.3-34　大小滑板移动顺序与轨迹

3　上下异形加工原理

数控电火花线切割机已大量应用于模具精密零件加工，一般锥度加工亦已用得很多。从锥度加工原理可知，工件上下图形是一对满足图纸尺寸等距扩大（缩小）的图形。它是基于直纹面加工的一种特例。对于上下异形的工件来说，上下图形不满足等距关系。采用四维加工技术实现了上下异形加工。

采用下述上下异形独立编程加工方法，应研究分析在加工中电极丝的运动轨迹，即从工件二端图形射影到上下线架平面上，通过上下线架投影轨迹的计算来获得工作台滑板 x、y 轴（电极丝平动）和上线架小滑板 uv 轴（电极丝倾斜）位移量，实现二个平面比例插补联动，解决上下异形加工的问题。以下通过几何图形较直观分析，建立上下投影轨迹的数学模型。

3.1　直纹面构造的几何机理

根据直纹曲面构造理论，给定工件的上下面轨迹和曲线端点以及路程参数时，可惟一地构造一个直纹面。以曲线弧长作为路程参数构造的直纹面是自然直纹面。对于上下图形，对应点不同将导致不同的直纹曲面产生。这是因为不同的标志点对应关系，改变路程参数变化区域。因而应合理标志上下图形相对应的点。

（1）上下面轨迹几何分段相等

上、下二面各段起、止点都一一对应，如图 3.3-35 所示，这种情况可以认为工件是由很多小直纹曲面组成，由于对应点位置均是已知的，可以不要标志直接进行轨迹叠加合成计算。

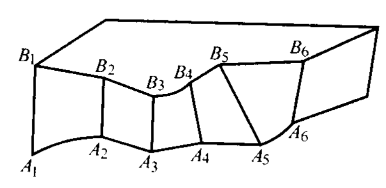


图 3.3-35 上下面轨迹几何分段相等

（2）上下图形按比例对段进行拆分

上下图形几何分段数不相等，各段无法找到一一对应的标志，需对有些段进行拆分产生新节点使上下各节点位置一一对应。这种拆分段产生节点由计算机根据确定的对应点计算公式来计算。如图 3.3-36 所示。图中 $A'_1A'_2$…… $B'_1B'_2$……是原图形的各端点的对应点。它是以整个弧长作为计算基准的。

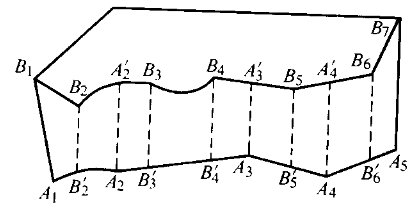


图 3.3-36 对段进行拆分产生新节点 K'

（3）上下图形中局部线段进行拆分

如果上下图形起终点一一对应，除此之外上下一些段端点注上 * 标志，对于未注标志端点段应进行拆分（图 3.3-37）。产生新节点与之一一对应，这些未标注 * 的端点之间的段数可能不等。实际上可认为对段进行拆分后，产生新节点形成一系列小直纹曲面，对这些小直纹面分别进行处理，对未注标志点所对应新节点坐标，由计算机根据对应点公式，确定它是以相关部分总弧长为计算基准的。例 A'_3 是下端 A_3 在上端的对应点和 $A_1^* A_2 B_2' A_3 A_4^*$ 弧长为计算基准的。综合上面讨论对图形标志原则如下。

1）工件上表面起、终点必须对应下表面起、终点。

2）工件上下表面图形对应标志应严格相等，如果不等应通过对段拆分，增加新节点等方法令其相等。

3）二相邻标志的工件上下表面轨迹的段数可以不等。

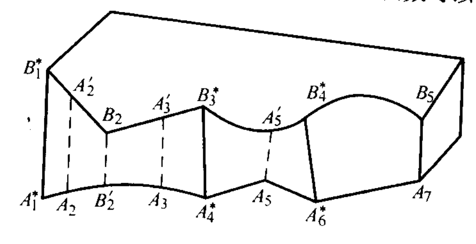


图 3.3-37 对部分未标志段拆分

（4）产生新节点计算

上下图形端点所对应新节点的计算参见图 3.3-35，假设工件上表上有 m 个端点记为 B_i（$i=1, 2, \cdots, m$）。工件下表面有 n 个基点记 A_j（$j=1, 2, \cdots, n$）。其中 B_1、B_m 分别是上表面轨迹起终点，A_1、A_m 为工件下表面的起终点。上下面轨迹每个端点均为已知：$(u_i v_i)$，和 $(x_j y_j)$。上表面相邻端点 B_{i-1} B_i 之间弧长为 l_{B_i}。下表面两相邻端点 A_{j-1} 和 A_j 之间弧长为 l_{A_j}。计算上表面 B_i 在下表面轨迹上的对应点 B'_i 以及下表面上的 A_j 在上表面轨迹上的对应点 A'_j。以 B'_i 计算为例。

先计算 B'_i 离 A_1 的弧长 $l_{B'}$。

$$l_{B'_i} = \frac{\sum_{k=2}^{n} lA_k}{\sum_{k=2}^{m} lB_k} = \sum_{k=2}^{i} l_{B_k}$$

如果 $\sum_{k=2}^{j-1} \leqslant l_{B'_i} \leqslant \sum_{k=2}^{j} l_{A_j}$，则 B'_i 点落在 A_{j-1} 和 A_j 之间的几何段上；如果 $l_{B'_i} = \sum_{k=2}^{j-1} l_{A_k}$，则 B'_i 和 A_{j-1} 点重合；如果 $l_{B'_i} = \sum_{k=2}^{j} l_{A_k}$，则 B'_i 与 A_j 点重合。

否则如果 $\sum_{k=2}^{j-1} l_{A_k} < l_{B'_i} < \sum_{k=2}^{j} l_{A_k}$，则说明 B'_i 点落在 A_{j-1} 和 A_j 之间；若 A_{j-1} 和 A_j 之间为直线段，则不难求出 B'_i 点的坐标

$$x_{B'_i} = \frac{l_{B'_i} - \sum_{k=2}^{j-1} l_{A_k}}{\sum_{k=2}^{j} l_{A_k} - \sum_{k=2}^{j-1} l_{A_k}}(x_j - x_{j-1}) + x_{j-1}$$

$$x_{B'_i} = \frac{l_{B'_i} - \sum_{k=2}^{j-1} l_{A_k}}{\sum_{k=2}^{j} l_{A_k} - \sum_{k=2}^{j-1} l_{A_k}}(y_j - y_{j-1}) + y_{j-1}$$

若 A_{j-1} 和 A_j 之间为圆弧段，假定圆弧的圆弧坐标为 (x_{ej}, y_{ej})，半径为 r_j，圆弧的起始角为 θ_{sj}，终止角 θ_{ej}，则 $A_{j-1}B'_i$ 所对应的圆心角 $\theta_{B'_i}$

$$\theta_{B'_i} = \frac{l_{B'_i} - \sum_{k=2}^{j-1} l_{A_k}}{A_j}$$

故不难求出 B'_i 点的坐标 $(x_{s_i}, y_{s'_i})$

$$\begin{cases} x_{B'_i} = x_{ej} + A_j\cos(\theta_{B_j} + \theta_{B'_i}) \\ y_{B'_i} = y_{ej} + A_j\sin(\theta_{B_j} + \theta_{B'_i}) \end{cases} \tag{3.3-33}$$

下表面轨迹上各基点 A_j 的对应点 A'_j 的计算类似于上述的公式，只是改变一下公式中的下标。

3.2 工件上下面轨迹线性化处理

（1）线性化处理原因

1）工件上下面轨迹影射到上下线架平面上，在一些情况下某些段会发生畸变，分析表明，只有工件上下面轨迹为直线对直线，或点对直线时，上下线架投影轨迹是直线，否则上下投影轨迹可能为圆弧或一些非圆复杂曲线。

2）二个对应直线插补计算很容易进行，而对二个非圆复杂曲线插补计算是很难实现的。

3）ISO 代码中提供有线性小轴联动的指令描述语句，可将此代码输入机器，直接进行比例联动插补计算，实现上下图形切割功能。

因而通常是对圆弧进行细分，在一定的误差范围内利用弦线长替代圆弧化成许多小折线，这就成了直线 – 直线的形式。

（2）线性化处理

得到了上下面轨迹上每个端点的对应点后，上下面轨迹被分割成上下一一对应的一系列几何小段。下面就可能出现的情况，讨论线性化处理的方法。

1）直线－直线对应　工件上表面的几何段为一直线段，下表面也为一直线段，这种情况无需进行线性化处理，数控系统具有四轴联动插补功能，因而可直接写出四轴联动的直线段指令。

2）直线—圆弧对应　当工件一个面的轨迹上的几何段为一直线，另一个面上的几何段为一圆弧，这就必须进行线性化处理。用弦线逼近圆弧且产生误差 δ 小于最大 δ_{max}，这样就分化多个弦线段，另一端直线段也必须细分为多线段，使之与多个弦线段一一对应。

① 逼近弦线求解　图 3.3-38 中的圆弧 AB，所对应的逼近弦长 L_m 为 2 倍的 ΔL，则不难求出：

$$\Delta L = R\sin(\theta/2) \tag{3.3-34}$$

式中，ΔL 为逼近弧线长度 L_m 的 1/2；R 为圆弧半径；θ 为所对应的圆心角。

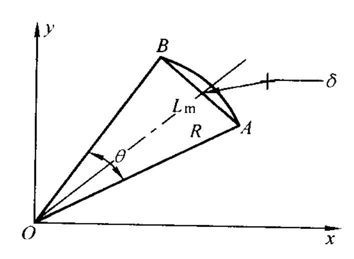


图 3.3-38　逼近弦线示意图

由图 3.3-38 还可得出：

$$\Delta L^2 + (R-\delta)^2 = R^2$$

式中 δ 为弦线逼近圆弧的最小误差，展开后得：

$$\Delta L^2 + R^2 + \delta^2 - 2R\delta = R^2$$

$$\Delta L = \sqrt{2R\delta - \delta^2}$$

δ_2 忽略不计，则有

$$\Delta L = \sqrt{2R\delta} \tag{3.3-35}$$

$$L_m = \sqrt{8R\delta} \tag{3.3-36}$$

假定取 $\delta \leqslant 1\ \mu m$，由式（3.3-34）还可得解：

$$\cos(\theta/2) = \frac{R-\delta}{R} = 1 - \frac{\delta}{R}$$

故有：

$$\theta = 2\arccos - 1(1 - \delta/R) \tag{3.3-37}$$

可见，式（3.3-36）所描述的最大圆心角 θ 是在 $\delta \leqslant 1\ \mu m$ 情况下获得的。

② 直线－圆弧线性化　假设图 3.3-39 圆弧的起点坐标（x_{si}，y_{si}），终点坐标（x_{ei}，y_{ei}），圆心（x_{ci}，y_{ci}），半径 r_{ri}，圆弧起始角 θ_{sri}，终止角 θ_{eri}，直线的起点坐标（u_{si}，v_{si}），终点（u_{ei}，v_{ei}）。为了保证线性化后的最大误差不大于允许误差 δ_a，同时使线性化后的几何段数最少，以 $\Delta\theta$ 等分整个圆弧段，从而得一系列节点，将每两个相邻节点用直线段连接，若直线段数记为 n，则：

$$n = \mathrm{INT}\left(\frac{\theta_{eri} - \theta_{sri}}{\Delta\theta} + 1\right) \tag{3.3-38}$$

式中，INT（）为取整函数；$\theta_{eri} - \theta_{sri}$ 为圆弧的包角。

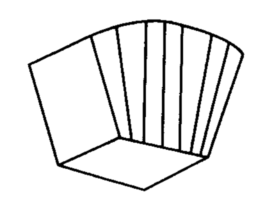


图 3.3-39　直线－圆弧的线性化

假设圆弧中间的 $n-1$ 个节点坐标为（x_{ij}，y_{ij}）（$j=1$，2，…，$n-1$），则

$$\begin{cases} x_{ij} = x_{ci} + r_{ri}\cos(\theta_{sri} + j\Delta\theta) \\ y_{ij} = y_{ci} + r_{ri}\sin(\theta_{sri} + j\Delta\theta)\ (j = 1,2,\cdots,\ n-1) \end{cases} \tag{3.3-39}$$

工件上表面的圆弧段被 n 段直线代替，则工件下表面的对应直线也必须分成 n 段，也就是要求出圆弧上各节点在下表面的对应点坐标（u_{ij}，v_{ij}）（$j=1$，2，…，$n-1$）

$$u_{ij} = \frac{u_{ei} - u_{si}}{\theta_{eri} - \theta_{sri}}(\theta_{sri} + j\Delta\theta) + \frac{\theta_{eri}u_{si} - \theta_{sri}u_{ei}}{\theta_{eri} - \theta_{sri}} \tag{3.3-40}$$

$$v_{ij} = v_{si} + \frac{v_{ei} - v_{si}}{u_{ei} - u_{si}}(u_{ij} - u_{si}) \qquad (j = 1,\ 2,\ \cdots,\ n-1)$$

上表面的 n 段直线与下表面的 n 段直线分别依次对应，从而将直线－圆弧的对应分解成 n 个直线－直线的对应。

3）圆弧－圆弧对应　当工件上下表面几何数均为圆弧，同样必须作线性化处理和线圆细化相类似。假设上表面圆弧的起点为（u_{si}，v_{si}），终点（u_{ei}，v_{ei}），半径 r_{si}，圆弧起始角 θ_{ssi}，终止角 θ_{esi}。如果允许的圆弧线性化误差为 δ_a，则上表面圆弧相应于 δ_a 的圆心角 $\Delta\theta$。

$$\Delta\theta_s = 2\arccos\left(1 - \frac{\delta_a}{r_{si}}\right) \tag{3.3-41}$$

下表面圆弧相应于 δ_a 的圆心角 $\Delta\theta_r$

$$\Delta\theta_r = 2\arccos\left(1 - \frac{\delta_a}{r_{si}}\right) \tag{3.3-42}$$

如果分别以 $\Delta\theta_s$ 和 $\Delta\theta_r$ 等分上下面的圆弧，则得到上下面圆弧段数分别为 n_s 和 n_r。

$$n_s = \mathrm{INT}\left(\frac{\theta_{esi} - \theta_{ssi}}{\Delta\theta_s} + 1\right) \tag{3.3-43}$$

$$n_r = \mathrm{INT}\left(\frac{\theta_{eri} - \theta_{sri}}{\Delta\theta_r} + 1\right)$$

当 $n_s > n_r$ 时，则说明上表面圆弧的分割段数比下表面圆弧的分割段数多，实际分割时应以上表面圆弧的分割为准，即以 $\Delta\theta_s$ 分割上表面的圆弧，得到 n_s-1 个节点，再计算出每个节点在下表面圆弧上的对应点，从而将下表面的圆弧也分成 n_s 段。假定节点坐标为（u_{ij}，v_{ij}）（$j=1$，2，…，n_s-1），其对应点坐标为（x_{ij}，y_{ij}）（$j=1$，2，…，n_s-1），可以得到下列公式：

$$\begin{cases} \theta_1 = \theta_{ssi} + j\Delta\theta_s \\ \theta_2 = \dfrac{\theta_{eri} - \theta_{sri}}{\theta_{esi} - \theta_{ssi}}\theta_1 + \dfrac{\theta_{sri}\theta_{esi} - \theta_{ssi}\theta_{eri}}{\theta_{esi} - \theta_{ssi}} \\ u_{ij} = u_{ei} + r_{si}\cos\theta_1 \\ v_{ij} = v_{ei} + r_{si}\sin\theta_1 \\ x_{ij} = x_{ei} + r_{ri}\cos\theta_2 \\ y_{ij} = y_{ei} + r_{ri}\sin\theta_2 \qquad (j = 1,\ 2,\ \cdots,\ n_s - 1) \end{cases} \tag{3.3-44}$$

当 $n_s < n_r$ 时，实际分割应以下表面圆弧的分割为准，同样可得到分割后的节点以及其对应点的坐标计算公式：

$$\begin{cases} \theta_2 = \theta_{sri} + j\Delta\theta_r \\ \theta_1 = \dfrac{\theta_{esi} - \theta_{ssi}}{\theta_{eri} - \theta_{sri}}\theta_2 + \dfrac{\theta_{ssi}\theta_{eri} - \theta_{sri}\theta_{esi}}{\theta_{eri} - \theta_{sri}} \\ u_{ij} = u_{ei} + r_{si}\cos\theta_1 \\ v_{ij} = v_{ei} + r_{si}\sin\theta_1 \\ x_{ij} = x_{ei} + r_{ri}\cos\theta_2 \\ y_{ij} = y_{ei} + r_{ri}\sin\theta_2 \qquad (j = 1,\ 2,\ \cdots,\ n_s - 1) \end{cases} \tag{3.3-45}$$

求出节点坐标和对应点坐标后，将每相邻两点用直线段连接，从而将圆弧－圆弧对应情况分解成 n_s 或 n_r 个直线－直线段的对应。

3.3　上下线架投影轨迹计算

对工件上下图形进行线性化处理和完整的对应点处理后就成为仅有直线构成的图形。工件上下端面直线型图形投影在上下线架上，也应是直线型，无畸变现象发生。电极丝相对于工件运动造成了工件的三维直纹曲面，计算电极丝在线架上下端面平面上的轨迹，这是上下异形加工一个重要的步骤。

(1) 上下线架投影的几何分析

图 3.3-40 是线切割机床安装工件后，所设定各平面的示意图。图中 H 为二线架中心距离，h 为下线到工件下底面距离，D 为工件厚度，h_1 为工件上端面到上线架距离，即 $h_1 = H-(D+h)$。

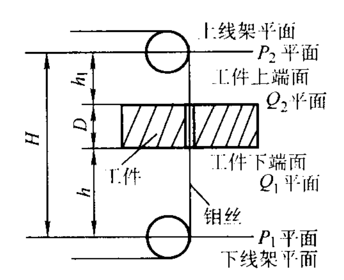


图 3.3-40　各平面示意图

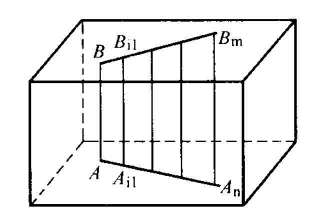


图 3.3-41　工件上下端面二直线

工件作上下异形加工时，电极丝（投影线）将通过工件上下端面上移动的二个对应点，如图 3.3-41，电极丝由初始位于上下二端面的 B、A 点上，B 点经 B_{i1}，B_{i2}……到达终点 B_m 点上，A 点经 A_{i1}，A_{i2}……到达终点 A_n 点上。取 $B-B_{i1}$、$A-A_{i1}$ 为二个很小的折线段影射到线架上下端面 P_2、P_1 平面上。图 3.3-41 中的 AA_{i1} 为工件下端面 Q_1 平面 AA_n 线的一小段，同样 BB_{i1} 为工件上端面 Q_2 平面 BB_n 线的一小段。

图 3.3-42 中 P 点为电极丝经 A、B 二点投影在下线架初始点，Q 点是投影在上线架 Q 平面的初始点，连结 AB_{i1}。

1) 分析电极丝从 $B \to B_{i1}$ 投影轨迹

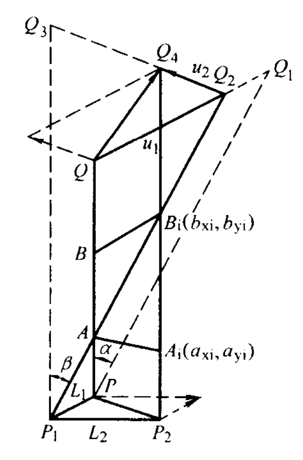


图 3.3-42　上下线架投影示意

① 线架上端 Q 平面内移动点 Q 至 Q_1 使 $QQ_1 /\!/ BB_{i1}$，由于 P 为支点，上线架移动时不动，产生 Q_2Q_1 偏移，要按下述情况 (2) 处理。

② 电极丝平移 PP_1 使下线架 P 移至 P_1，上线架 Q_1 移至 Q_2 使 $QQ_2 /\!/ BB_{i1}$；$PP_1 /\!/ BB_{i1}$ 消除了①引起的偏移，使电极丝停留在工件下端面 A、上端面 B_i 上，由①，②归并产生 $Q \to Q_2$ 和 $P \to P_1$ 移动轨迹。

2) $A \to A_{i1}$ 投影轨迹

① 在 Q 平面内移动 Q_2 至 Q_3 点上，此时下线架 P 平面内点 P_1（在电极丝倾斜时）静止不动，且使 $Q_2Q_3 /\!/ AA_{i1}$。

② 平移 Q_3P_1 至 Q_4P_2（电极丝平动）使

$$P_1P_2 /\!/ AA_{i1},\quad Q_3Q_4 /\!/ AA_{i1}$$

按上述二种情况处理，线架上端 Q 平面内使电极丝经过工件 $B_{i1}A_{i1}$ 点 Q_4 为上线架投影点，P_2 为下线架投影点。

(2) 下线架轨迹投影计算

1) 以上几何方法，可使工件 AB 二端点移至 A_{i1} B_{i1} 点上，同时也产生了 Q_4，P_4 的投影点。

设 $QQ_2 = l_1$，$PP_1 = L_1$，则 $u_1 = l_1 + L_1$，$BB_{i1} = b_{i1}$ 工件上端面线长度，投影坐标 B_{i1} (b_{xi1}，b_{yi1})，$Q_2Q_3 = l_2$，$P_1P_2 = L_2$；则有 $u_2 = l_2 + L_2$，$AA_{i1} = a_{i1}$ 工件下端面线长度，投影坐标 (a_{xi1}，b_{yi1})。

下线架投影轨迹 $P \to P_2$ 长度为 L，投影为 $x_{i1}\,y_{i1}$

上线架投影轨迹 $Q \to Q_4$ 长度为 u，投影为 $u_{i1}\,v_{i1}$

$$l_1 = (H/D) \times b_{i1} \quad (3.3\text{-}46)$$

$$L_1 = -(h/D) \times b_{i1} \quad (3.3\text{-}47)$$

$$u_1 = l_1 + L_1 = [(H-h)/D] \times b_{i1} \quad (3.3\text{-}48)$$

$$l_2 = -(H/D) \times a_i \quad (3.3\text{-}49)$$

$$L_2 = [(D+h)/D] \times a_{i1} \quad (3.3\text{-}50)$$

$$u_2 = l_2 + L_2 = [(-H+D+h)/D] \times a_{i1} \quad (3.3\text{-}51)$$

式 (3.3-46) + 式 (3.3-50) 得

$$\begin{aligned} L &= -(h/D) \times b_{i1} + [(D+h)/D] \times a_{i1} \\ &= a_{i1} + \frac{h}{D}a_{i1} - \frac{h}{D}b_{i1} \\ &= a_{i1} + \frac{h}{D}(a_{i1} - b_{i1}) \end{aligned} \quad (3.3\text{-}52)$$

式 (3.3-52) 为下线架投影轨迹。式 (3.3-48) + 式 (3.3-51) 可得

$$\begin{aligned} u &= [(H-h)/D] \times b_{i1} + [(-H+D+h)/D] \times a_{i1} \\ &= b_{i1} + \frac{H-h-D}{D}b_{i1} + \frac{-H+D+h}{D}a_{i1} \\ &= b_{i1} + \frac{H-h-D}{D}(b_{i1} - a_{i1}) \\ &= b_{i1} + \frac{h_1}{D}(b_{i1} - a_{i1}) \end{aligned} \quad (3.3\text{-}53)$$

式中，h_1 为上线架到工件上端面距离。式 (3.3-53) 为上线架投影，从而可得

$$x_{i1} = ax_{i1} + (h/D)(ax_{i1} - bx_{i1})$$

$$y_{i1} = ay_{i1} + (h/D)(ay_{i1} - by_{i1})$$

$$u_{i1} = bx_{i1} + (h_1/D)(bx_{i1} - ax_{i1})$$

$$v_{i1} = by_{i1} + (h_1/D)(by_{i1} - ay_{i1})$$

2) 在线架上端 Q 平面上，QQ_4 的轨迹是 $QQ_2 + Q_2Q_4$ 矢量和。由图 3.3-43 矢量图可知，当以 Q 为原点同时移动 QQ_2 和 Q_2Q_4 对边，按平行四边形法则易知，P 至 P_2 点是沿着合成轨迹为 QQ_4 段线行进的，避免了绕过 Q_2 再到 Q_4。

同样在线架下端 P 平面上，PP_2 的轨迹是 $PP_1 + P_1P_2$ 矢量和，同样 P 沿着 PP_2 的直线行进的而不产生绕 P_1 到 P_2 折边轨迹。

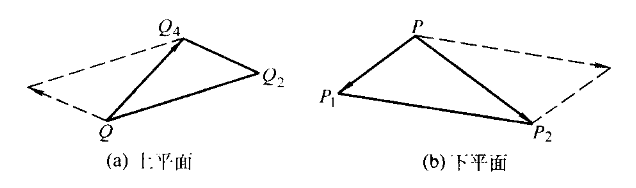


图 3.3-43 上下平面矢量图

工件上下端面二直线可看成许多 AA_{i1}、BB_{i1} 小折线，线性几何段的集合，因而得 QP 平面内投影公式：

$$\delta_x = \Delta a_x + (h/D)(\Delta a_x - \Delta b_x) \quad (3.3\text{-}54)$$

$$\delta_y = \Delta a_y + (h/D)(\Delta a_y - \Delta b_y) \quad (3.3\text{-}55)$$

$$\delta_u = \Delta b_x + (h_1/D)(\Delta b_x - \Delta a_x) \quad (3.3\text{-}56)$$

$$\delta_v = \Delta b_y + (h_1/D)\Delta b_y - \Delta a_y) \quad (3.3\text{-}57)$$

式中，Δa_x，Δa_y 为工件底部移动轨迹坐标增量；Δb_x，Δb_y 为工件上端移动轨迹坐标增量；δ_x，δ_y 为下线架 P 平面上投影轨迹分量；δ_u，δ_v 为上线架 Q 平面上投影轨迹分量。

3）大滑板（x 轴 y 轴）（平动）小滑板（u 轴 v 轴）（倾斜）运动轨迹 从图 3.3-44 中可看出下线架 R 平面轨迹是靠大滑板运动（平动）得来的，电极丝倾斜不影响它的位置。所以电极丝平动（$\delta_x\delta_y$）分量（相对大滑板）为式（3.3-54）和式（3.3-55）。

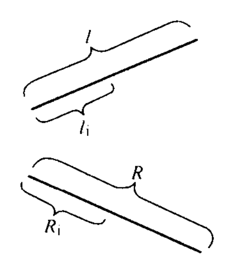


图 3.3-44 大小滑板运动轨迹

线架上端轨迹由式（3.3-48）和式（3.3-51）可得：

$$\mu = l_1 + L_1 + l_2 + L_2 = (l_1 + l_2) + (L_1 + L_2)$$

式中（$L_1 + L_2$）是电极丝平动轨迹；（$l_1 + l_2$）是上线架运动（电极丝倾斜）轨迹。所以 Q 平面上线架运动轨迹为下线架平面 P 平面上运动轨迹和小滑板运动轨迹之和，即：

$$\delta_\mu = \delta_u - \delta_x = \Delta b_x + (h_1/D)(\Delta b_x - \Delta a_x) - [\Delta a_x + (h/D)(\Delta a_x - \Delta b_x)] = \frac{H}{D}(\Delta b_x - \Delta a_x)$$

$$\delta_\gamma = \delta_v - \delta_y = \Delta b_y + (h_1/D)(\Delta b_y - \Delta a_y) - [\Delta a_y + (h/D)(\Delta a_y - \Delta b_y)] = \frac{H}{D}(\Delta b_y - \Delta a_y) \quad (3.3\text{-}58)$$

所以：

① 按 H，D，h_1 已知量，工件二端 Δa_x，Δa_y，Δb_x，Δb_y 在线架上下端投影是很易获得。

② 下线架投影轨迹（电极丝平动）：

$$\delta_x = \Delta a_x + (h/D)(\Delta a_x - \Delta b_x) \quad (3.3\text{-}59)$$

$$\delta_y = \Delta a_y + (h/D)(\Delta a_y - \Delta b_y) \quad (3.3\text{-}60)$$

③ 上线架投影轨迹（平动 + 倾斜）：

$$\delta_u = \Delta b_x + (h_1/D)(\Delta b_x - \Delta a_x) \quad (3.3\text{-}61)$$

$$\delta_v = \Delta b_y + (h_1/D)(\Delta b_y - \Delta a_y) \quad (3.3\text{-}62)$$

④ 小滑板投影轨迹（倾斜）：

$$\delta_u = (H/D)(\Delta b_x - \Delta a_x) \quad (3.3\text{-}63)$$

$$\delta_v = (H/D)(\Delta b_y - \Delta a_y) \quad (3.3\text{-}64)$$

⑤ G 指令四维加工直线指令分别为：

$$\text{G01x}\delta_x\text{y}\delta_y\text{u}\delta_u\text{v}\delta_v$$

这里 δ_u，δ_v 为上线架合成量。

$$\text{G01x}\delta_x\text{y}\delta_y\text{u}\delta_\mu\text{v}\delta_\gamma$$

这里 δ_u、δ_γ 为小滑板进给量，δ_x、δ_y 为电极丝（相对大滑板）进给量。

3.4 一种上下异形比例插补方法

上下异形加工时，通过图形线性化处理化成线、线对应的线型，可对此进行二平面直线联动插补。由于平动和倾斜线型不一定相似，不能使用前述 $R-l$ 来联动插补，以下介绍一种上下异形比例插补方法，进行上下异形加工。

图 3.3-44 直线 l、R（可分别代表小滑板运动轨迹和大滑板运动轨迹）按相同比例二线段 l_i、R_i 的各自在对应轴上投影分别为 $l_x l_y$；$R_x R_y$，即时线段投影为 $i_x l_{iy}$；$R_{ix} R_{iy}$。根据比例有：

$$\frac{l}{l_i} = \frac{R}{R_i} \quad (3.3\text{-}65)$$

$$\frac{l}{l_i} = \frac{l_x}{l_{ix}} = \frac{l_y}{l_{iy}} \quad (3.3\text{-}66)$$

式（3.3-66）整理后得：

$$\frac{l_x + l_y}{l_{ix} + l_{iy}} = \frac{l}{l_i} \quad (3.3\text{-}67)$$

同理得：

$$\frac{R_x + R_y}{R_{ix} + R_{iy}} = \frac{R}{R_i} \quad (3.3\text{-}68)$$

由式（3.3-65）和式（3.3-66）得：

$$\frac{l_x + l_y}{l_{ix} + l_{iy}} = \frac{R_x + R_y}{R_{ix} + R_{iy}} = \frac{l_{ix} + l_{iy}}{R_{ix} + R_{iy}} \quad (3.3\text{-}69)$$

式中 $l_{ix} + l_{iy}$——l 线增量，设为 Δl；$R_{ix} + R_{iy}$——R 线增量，设为 ΔR；$l_x + l_y$——l 线二轴投影分量之和，设为 l_{xy}；$R_x + R_y$——R 线二轴投影分量之和，设为 R_{xy}。

所以，式（3.3-69）可改写为：

$$l_{xy}\Delta R = R_{xy}\Delta l \quad (3.3\text{-}70)$$

由此得到比例插补式：

$$G = R_{xy}\Delta l - l_{xy}\Delta R \quad (3.3\text{-}71)$$

显然它和 $R-l$ 比例插补式类同，所区别的是用线段分轴投影和 $\Delta x + \Delta y \to R$，$l_x + l_y \to l$ 为二个平面中，各自投影分量之和。

当 $G \geqslant 0$ $\quad G_{n+1} = R_{xy}\Delta l - l_{xy}(\Delta R + l) = G_n - l_{xy} \quad (3.3\text{-}72)$

$G < 0$ $\quad G_{n+1} = R_{xy}(\Delta l + l) - l_{xy}\Delta R = G_n + R_{xy} \quad (3.3\text{-}73)$

在锥度加工 R_m 求取比较麻烦时，同样可采用 G 指令，对二个平面的各自投影分量累加获 R、l 值，实现四轴联动加工。

如果把 l 直线看作是小滑板 u v 轴轨迹线，R 直线作为平动 x 轴 y 轴轨迹，可得图 3.3-45 所示插补框图。

这里仅给出比例插补联动，决定大小滑板进给和运算的框图。至于终点判别和两套逐点比较判别，各自产生进给运算从略。

按该插补流程，每次运算只能在一根轴上进给 1 步（上下二平面轴不能同时进给），使加工速度变慢，根据二平面插补联动方法，可以把轨迹总投影大的某一个平面进给和运算，保持连续不间断，而总投影轨迹小的这个平面进给和插补运算，则根据比例联动插补运算的具体规定来决定实时的进给和插补运算：

$$\Delta x + \Delta y = R;\ \Delta u + \Delta v = l \quad (3.3\text{-}74)$$

如果 $R - l \geqslant 0$

$$R - l = A;\ l = B \quad (3.3\text{-}75)$$

判别式 G 作如下运算：

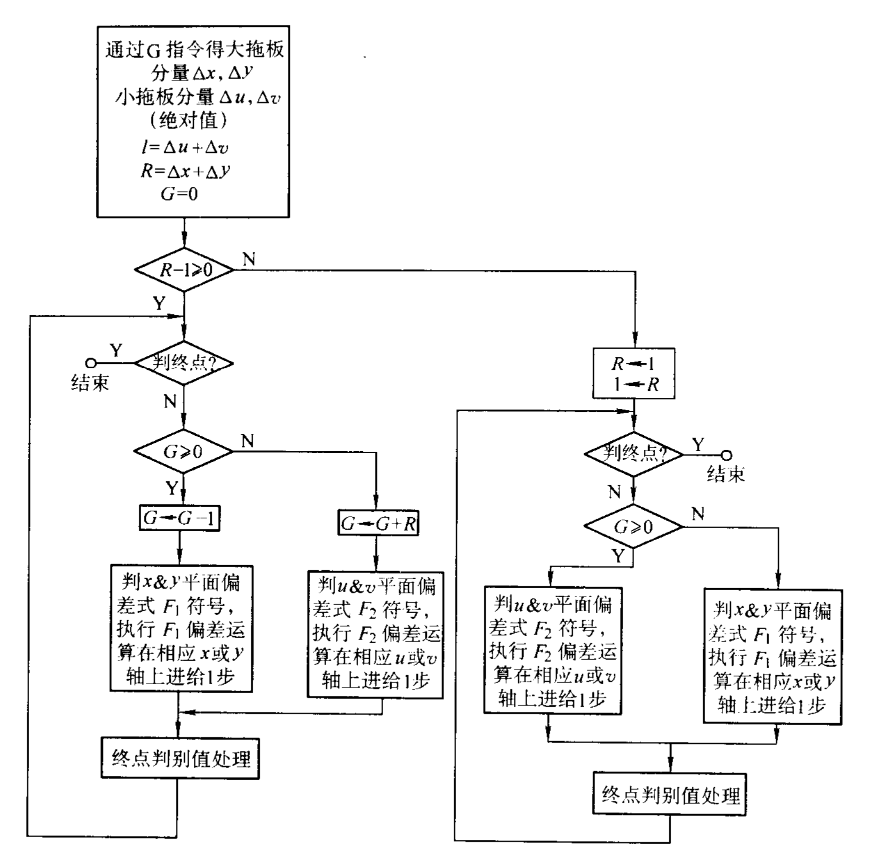


图 3.3-45 插补流程框图

$G \geqslant 0$: $G \leftarrow G-A$ 进给运算 $x\&y$ 的量和进给运算 $u\&v$ 的量;

$G<0$: $G \leftarrow G+B$ 进给运算 $x\&y$ 的量和进给运算 $u\&v$ 的量。

如果 $R-l<0$

$$l-R=A;\ R=B \tag{3.3-76}$$

$G \geqslant 0$: $G \leftarrow G-A$ 进给运算 $u\&v$ 的量和进给运算 $x\&y$ 的量;

$G<0$: $G \leftarrow G+B$ 进给运算 $u\&v$ 的量和进给运算 $x\&y$ 的量。

按上面 G 判别式处理实现了一个平面连续进给和插补运算,另一个平面,按比例插补联动规则实现进给和运算,具体方法见下例。

3.5 四轴联动编程简要算法框图及计算实例

上下二图形可在二维自动编程系统中生成 ISO 指令,合成四轴联动程序用于上下异形加工,其四轴联动工作流程图如图 3.3-46 所示。

例 1 上下各为不同形状六边形,A 为工件下底图形 ISO 指令,B 为工件上端图形 ISO 指令,见表 3.3-13。

上下异形编程输入参数:$H=150$ mm(线架二端距离),$h=60$ mm(下线到工件下端面距离),$D=80$ mm(工件厚度)。

计算:$(D+h)/D=(80+60)/80=1.75$

$(H-h-D)/D=(150-60-80)/80=0.125$

公式:$x=(D+h)/D(x_A-x_B)+x_B$

$y=(D+h)/D(y_A-y_B)+y_B$

$u=[-(H-h-D)/D](x_A-x_B)+x_B$

$v=[-(H-h-D)/D](y_A-y_B)+y_B$

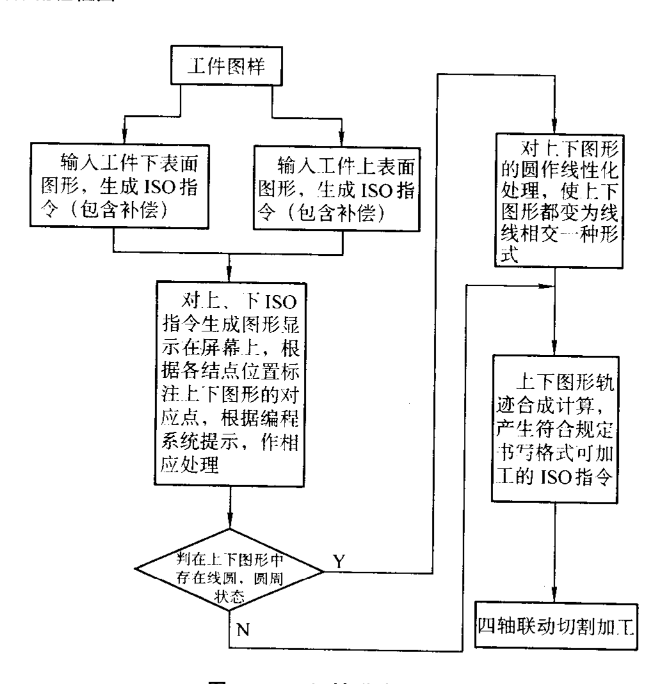


图 3.3-46 四轴联动编程法

表 3.3-13 四轴联动加工指令

No	A	B
1	G01 x -11723 y 9796	G01 x -8667 y 7975
2	G01 x -7917 y 12427	G01 x -11333 y 18025
3	G01 x 5635 y 18055	G01 x 7667 y 15744

续表 3.3-13

No	A	B
4	G01 x 20223 y 4731	G01 x 20666 y 2437
5	G01 x 12439 y − 11804	G01 x 11167 y − 13737
6	G01 x − 2099 y − 18422	G01 x − 4167 y − 17285
7	G01 x − 28281 y − 4987	G01 x − 24000 y − 5184
8	G01 x 11723 y − 9796	G01 x 8667 y − 7975

生成上下异形加工 ISO 指令：

$$x_1 = 1.75(-11723+8667)-8667 = -14015$$
$$y_1 = 1.75(9796-7975)+7975 = 11162$$
$$u_1 = -0.125(-11723+8667)-8667 = -8285$$
$$v_1 = -0.125(9796-7975)+7975 = 7747$$

故有① G01 $x-14015$ y 11162 $u-8285$ v 7747

$$x_2 = 1.75(-7917+11333)-11333 = -5355$$
$$y_2 = 1.75(12427-18025)+18025 = 8229$$
$$u_2 = -0.125(-7917+11333)-11333 = -11760$$
$$v_2 = -0.125(12427-18025)+18025 = 18725$$

故有② G01 $x-5355$ y 8229 $u-11760$ v 18725

$$x_3 = 1.75(5635-7667)+7667 = 4111$$
$$y_3 = 1.75(18055-15744)+15744 = 19788$$
$$u_3 = -0.125(5635-7667)+7667 = 7921$$
$$v_3 = -0.125(18055-15744)+15744 = 15455$$

故有③ G01 x 4111 y 19788 u 7921 v 15455

$$x_4 = 1.75(20233-20666)+20666 = 19891$$
$$y_4 = 1.75(4731-2437)+2437 = 6452$$
$$u_4 = -0.125(20233-20666)+20666 = 20721$$
$$v_4 = -0.125(4731-2437)+2437 = 2150$$

故有④ G01 x 19891 y 6452 u 20721 v 2150

$$x_5 = 1.75(12439-11167)+11167 = 13393$$
$$y_5 = 1.75(-11804+13737)-13737 = 10354$$
$$u_5 = -0.125(12439-11167)+11167 = 11008$$
$$v_5 = -0.125(-11804+13737)-13737 = 13979$$

故有⑤ G01 x 13393 y 10354 u 11008 v 13979

$$x_6 = 1.75(-2099+4167)-4167 = -548$$
$$y_6 = 1.75(-18422+17285)-17285 = -19275$$
$$u_6 = -0.125(-2099+4167)-4167 = -4426$$
$$v_6 = -0.125(-18422+17285)-17285 = -17143$$

故有⑥G01 $x-548$ $y-19275$ $u-4426$ $v-17143$

$$x_7 = 1.75(-28281+24000)-24000 = -31492$$
$$y_7 = 1.75(-4987+5184)-5184$$
$$u_7 = -0.125(-28281+24000)-24000 = -23465$$
$$v_7 = -0.125(-4987+5184)-5184 = -5209$$

故有⑦ G01 $x-31492$ $y-4839$ $u-23465$ $v-5209$

$$x_8 = 1.75(11723-8667)+8667 = 14015$$
$$y_8 = 1.75(-9796+7975)-7975 = 11162$$
$$u_8 = -0.125(11723-8667)+8667 = 8285$$
$$v_8 = -0.125(-9796+7975)-7975 = -7747$$

故有⑧ G01 x 14015 y 11162 u 8285 v − 7747

通过以上计算可得合成后的 ISO 指令如表 3.3-14 所示。

表 3.3-14 上下异形切割的 G 代码

G01	x − 14015	y 11162	u − 8285	v 7747
G01	x − 5355	y 8229	u − 11760	v 18725
G01	x 4111	y 19788	u 7921	v 15455
G01	x 19891	y 6452	u 20721	v2150
G01	x 13393	y − 10354	u 11008	v − 13979
G01	x − 548	y − 19275	u − 4426	v − 17143
G01	x − 31492	y − 4839	u − 23465	v − 5209
G01	x 14015	y − 11162	u 8285	v − 7747

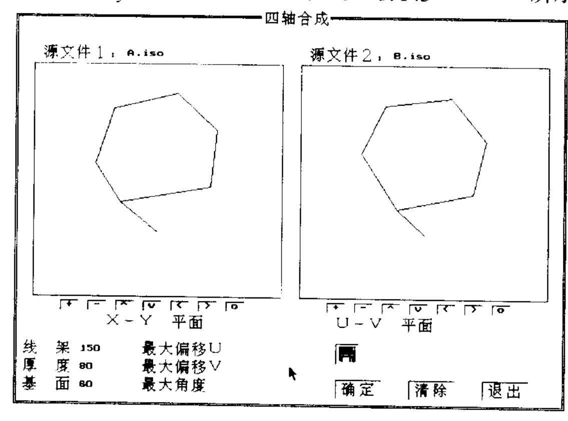
注：u、v 为线架上端面电极丝平动与倾斜的合成轨迹。

在实际运算中，应使用小滑板的轨迹进行插补，小滑板轨迹为 u'，v'，$u'=u-x$，$v'=v-y$，工作程序如表 3.3-15。

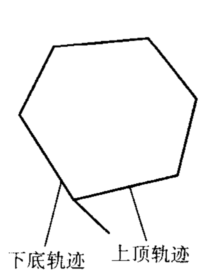
表 3.3-15 小滑板工作程序

G01	x − 14015	y 11162	u′ 5730	v′ − 3415
G01	x − 5355	y 8229	u′ − 6405	v′10496
G01	x 4111	y 19788	u′ 3810	v′ − 4333
G01	x 19891	y 6452	u′ 830	v′ − 4302
G01	x 13393	y − 10354	u′ − 2385	v′ − 3625
G01	x − 548	y − 19275	u′ − 3878	v′ 2132
G01	x − 31492	y − 4839	u′8027	v′370
G01	x 14015	y − 11162	u′ − 5730	v′3415

四轴合成可通过软件来完成计算，程序附图如图 3.3-47 所示（A iso 为下底图形，B iso 为上顶图形）。



（a）四轴合成编程界面



（b）上下图形轨迹

图 3.3-47 四轴联动加工程序附图



例 2　用投影总和获得 R_m 比例插补实例，如图 3.3-48。

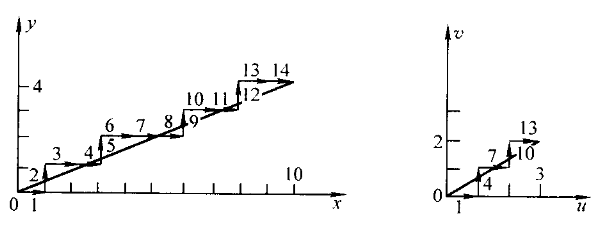


图 3.3-48　例 2 插补轨迹

G01　x 10　y 4　u 13　v 6

实际上下滑板的行进量应为：大滑板走的量为 x 10，y 4；小滑板走的量为 u 3，v 2；起点均为（0，0），

$$R = 10 + 4 = 14 \quad l = (13 - 10) + (6 - 4) = 5$$

$$\therefore A = R - = 14 - 5 = 9 \quad B = 5$$

初始 $G = 0$，$F_1 = 0$，$F_2 = 0$；

① 大小滑板的联动插补计算，如表 3.3-16。

表 3.3-16　大小滑板联动插补

序号	进给偏差判别	进给偏差计算	进给
1	$G \geq 0$	$G = 0 - 9 = -9$	同时执行大小滑板进给和计算
2	$G < 0$	$G = -9 + 5 = -4$	仅执行大滑板进给和计算
3	$G < 0$	$G = -4 + 5 = 1$	仅执行大滑板进给和计算
4	$G \geq 0$	$G = 1 - 9 = -8$	同时执行大小滑板进给和计算
5	$G < 0$	$G = -8 + 5 = -3$	仅执行大滑板进给和计算
6	$G < 0$	$G = -3 + 5 = 2$	仅执行大滑板进给和计算
7	$G \geq 0$	$G = 2 - 9 = -7$	同时执行大小滑板进给和计算
8	$G < 0$	$G = -7 + 5 = -2$	仅执行大滑板进给和计算
9	$G < 0$	$G = -2 + 5 = 3$	仅执行大滑板进给和计算
10	$G \geq 0$	$G = 3 - 9 = -6$	同时执行大小滑板进给和计算
11	$G < 0$	$G = -6 + 5 = -1$	仅执行大滑板进给和计算
12	$G < 0$	$G = -1 + 5 = 4$	仅执行大滑板进给和计算
13	$G \geq 0$	$G = 4 - 9 = -5$	同时执行大小滑板进给和计算
14	$G < 0$	$G = -5 + 5 = 0$	仅执行大滑板进给和计算

② 大小滑板分别插补计算，如表 3.3-17。

表 3.3-17　大小滑板分别插补

序号	xy 进给偏判别	xy 进给	xy 进给偏差计算	uv 进给偏差判别	uv 进给	uv 进给偏差计算
1	$F_1 \geq 0$	进给 x	$F_1 = 0 - 4 = -4$	$F_2 \geq 0$	进给 u	$F_2 = 0 - 2 = -2$
2	$F_1 < 0$	进给 y	$F_1 = -4 + 10 = 6$	—	—	—
3	$F_1 \geq 0$	进给 x	$F_1 = 6 - 4 = 2$	—	—	—
4	$F_1 \geq 0$	进给 x	$F_1 = 2 - 4 = -2$	$F_2 < 0$	进给 v	$F_2 = -2 + 3 = 1$
5	$F_1 < 0$	进给 y	$F_1 = -2 + 10 = 8$	—	—	—
6	$F_1 \geq 0$	进给 x	$F_1 = 8 - 4 = 4$	—	—	—
7	$F_1 \geq 0$	进给 x	$F_1 = 4 - 4 = 0$	$F_2 \geq 0$	进给 u	$F_2 = 1 - 2 = -1$
8	$F_1 \geq 0$	进给 x	$F_1 = 0 - 4 = -4$	—	—	—
9	$F_1 < 0$	进给 y	$F_1 = -4 + 10 = 6$	—	—	—
10	$F_1 \geq 0$	进给 x	$F_1 = 6 - 4 = 2$	$F_2 < 0$	进给 v	$F_2 = -1 + 3 = 2$
11	$F_1 \geq 0$	进给 x	$F_1 = 2 - 4 = -2$	—	—	—
12	$F_1 < 0$	进给 y	$F_1 = -2 + 10 = 8$	—	—	—
13	$F_1 \geq 0$	进给 x	$F_1 = 8 - 4 = 4$	$F_2 \geq 0$	进给 u	$F_2 = 2 - 2 = 0$
14	$F_1 \geq 0$	进给 x	$F_1 = 4 - 4 = 0$	—	—	—

例 3　图 3.3-49 所示加工程序

G02　x 7　y 7　I 0　J 0　u 12　v 12

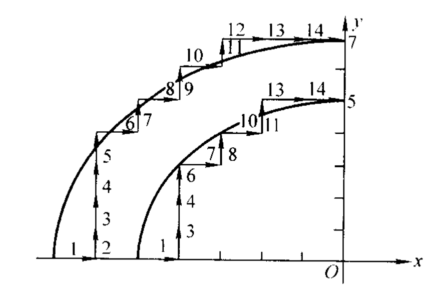


图 3.3-49　例 3 工作过程示意图

实际上下滑板的行进量应为：大滑板走的量为 x 7，y 7，起点（-7，0）。

小滑板走的量为 u5，v5；起点（-5，0），

$R = 7 + 7 = 14$　$l = 5 + 5 = 10$　$R - l = 7 - 5 = 2$

$\therefore A = 14 - 10 = 4$　$B = 10$　$G = 0$　$F_1 = 0$　$F_2 = 0$

① 大小滑板联动插补计算，如表 3.3-18。

表 3.3-18　大小滑板联动插补

序号	进给偏差判别	进给偏差计算	进给
1	$G \geq 0$	$G = 0 - 4 = -4$	同时执行大小滑板进给和计算
2	$G < 0$	$G = -4 + 10 = 6$	仅执行大滑板进给和计算
3	$G \geq 0$	$G = 6 - 4 = 2$	同时执行大小滑板进给和计算
4	$G \geq 0$	$G = 2 - 4 = -2$	同时执行大小滑板进给和计算
5	$G < 0$	$G = -2 + 10 = 8$	仅执行大滑板进给和计算
6	$G \geq 0$	$G = 8 - 4 = 4$	同时执行大小滑板进给和计算
7	$G \geq 0$	$G = 4 - 4 = 0$	同时执行大小滑板进给和计算
8	$G \geq 0$	$G = 0 - 4 = -4$	同时执行大小滑板进给和计算
9	$G < 0$	$G = -4 + 10 = 6$	仅执行大滑板进给和计算
10	$G \geq 0$	$G = 6 - 4 = 2$	同时执行大小滑板进给和计算
11	$G \geq 0$	$G = 2 - 4 = -2$	同时执行大小滑板进给和计算
12	$G < 0$	$G = -2 + 10 = 8$	仅执行大滑板进给和计算
13	$G \geq 0$	$G = 8 - 4 = 4$	同时执行大小滑板进给和计算
14	$G \geq 0$	$G = 4 - 4 = 0$	同时执行大小滑板进给和计算

② 大小滑板分别插补计算，如表 3.3-19。

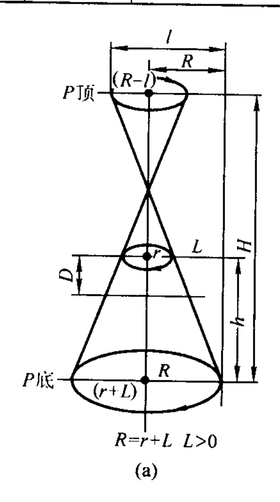
3.6　上下线架图形轨迹联动简介

以往比例联动方法是基于平动（大滑板）进给及小滑板（倾斜）进给按比例分配，实现上下异形和斜度加工。这种联动方法影响插补轨迹精度，如果严格按照上顶下底上下线架二端图形轨迹，实施比例联动，那么在设定的高度位置上，图形轨迹是根据上下轨迹按比例截取，这样将提高插补轨迹的精度。采用下述方法可实现对上顶下底图形轨迹的联动。

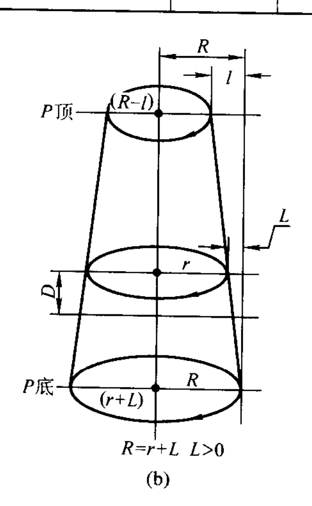
一般线切割机床采用平动 + 倾斜机构，在不改变机械结构前提下，可以采用软件方法处理，使进给输出量严格按照上、下轨迹实行联动分配。图 3.3-50 所示上顶和下底图形轨迹，设工件刃口面高度为 h，厚度为 D，偏移量为 L。

表 3.3-19 大小滑板分别插补

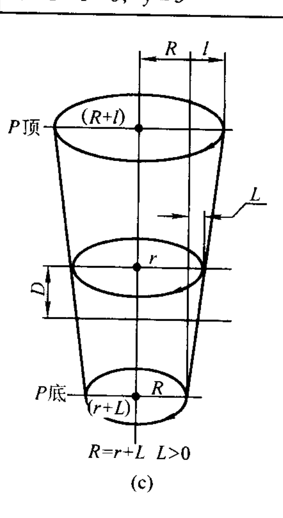
序号	xy 进给偏差判别	xy 进给	xy 进给偏差计算	uv 进给偏差判别	uv 进给	uv 进给偏差计算
1	$F_1 \geqslant 0$	进给 x	$F_1 = F_1 - 2x + 1 = 0 - 2 \times 7 + 1 = -13$ $x = 7 - 1 = 6$，$y = 0$	$F_2 \geqslant 0$	进给 u	$F_2 = F_2 - 2x + 1 = 0 - 2 \times 5 + 1 = -9$ $x = 5 - 1 = 4$，$y = 0$
2	$F_1 < 0$	进给 y	$F_1 = F_1 + 2y + 1 = -13 + 2 \times 0 + 1 = -12$ $x = 6$，$y = 0 + 1 = 1$	—	—	—
3	$F_1 < 0$	进给 y	$F_1 = F_1 + 2y + 1 = -12 + 2 \times 1 + 1 = -9$ $x = 6$，$y = 1 + 1 = 2$	$F_2 < 0$	进给 v	$F_2 = F_2 + 2y + 1 = -9 + 2 \times 0 + 1 = -8$ $x = 4$，$y = 0 + 1 = 1$
4	$F_1 < 0$	进给 y	$F_1 = F_1 + 2y + 1 = -9 + 2 \times 2 + 1 = -4$ $x = 6$，$y = 2 + 1 = 3$	$F_2 < 0$	进给 v	$F_2 = F_2 + 2y + 1 = -8 + 2 \times 1 + 1 = -5$ $x = 4$，$y = 1 + 1 = 2$
5	$F_1 < 0$	进给 y	$F_1 = F_1 + 2y + 1 = -4 + 2 \times 3 + 1 = 3$ $x = 6$，$y = 3 + 1 = 4$	—	—	—
6	$F_1 \geqslant 0$	进给 x	$F_1 = F_1 - 2x + 1 = 3 - 2 \times 6 + 1 = -8$ $x = 6 - 1 = 5$，$y = 4$	$F_2 < 0$	进给 v	$F_2 = F_2 + 2y + 1 = -5 + 2 \times 2 + 1 = 0$ $x = 4$，$y = 2 + 1 = 3$
7	$F_1 < 0$	进给 y	$F_1 = F_1 + 2y + 1 = -8 + 2 \times 4 + 1 = 1$ $x = 5$，$y = 4 + 1 = 5$	$F_2 \geqslant 0$	进给 u	$F_2 = F_2 - 2x + 1 = 0 - 2 \times 4 + 1 = -7$ $x = 4 - 1 = 3$，$y = 3$
8	$F_1 \geqslant 0$	进给 x	$F_1 = F_1 - 2x + 1 = 1 - 2 \times 5 + 1 = -8$ $x = 5 - 1 = 4$，$y = 5$	$F_2 < 0$	进给 v	$F_2 = F_2 + 2y + 1 = -7 + 2 \times 3 + 1 = 0$ $x = 3$，$y = 3 + 1 = 4$
9	$F_1 < 0$	进给 y	$F_1 = F_1 + 2y + 1 = -8 + 2 \times 5 + 1 = 3$ $x = 4$，$y = 5 + 1 = 6$	—	—	—
10	$F_1 \geqslant 0$	进给 x	$F_1 = F_1 - 2x + 1 = 1 - 2 \times 4 + 1 = -4$ $x = 4 - 1 = 3$，$y = 6$	$F_2 \geqslant 0$	进给 u	$F_2 = F_2 - 2x + 1 = 0 - 2 \times 3 + 1 = -5$ $x = 3 - 1 = 2$，$y = 4$
11	$F_1 < 0$	进给 y	$F_1 = F_1 + 2y + 1 = -4 + 2 \times 6 + 1 = 9$ $x = 3$，$y = 6 + 1 = 7$	$F_2 < 0$	进给 v	$F_2 = F_2 - 2y + 1 = -5 + 2 \times 4 + 1 = 4$ $x = 2$，$y = 4 + 1 = 5$
12	$F_1 \geqslant 0$	进给 x	$F_1 = F_1 - 2x + 1 = 9 - 2 \times 3 + 1 = 4$ $x = 3 - 1 = 2$，$y = 7$	—	—	—
13	$F_1 \geqslant 0$	进给 x	$F_1 = F_1 - 2x + 1 = 4 - 2 \times 2 + 1 = 1$ $x = 2 - 1 = 1$，$y = 7$	$F_2 \geqslant 0$	进给 u	$F_2 = F_2 - 2x + 1 = 4 - 2 \times 2 + 1 = 1$ $x = 2 - 1 = 1$，$y = 5$
14	$F_1 \geqslant 0$	进给 x	$F_1 = F_1 - 2x + 1 = 1 - 2 \times 1 + 1 = 0$ $x = 1 - 1 = 0$，$y = 7$	$F_2 \geqslant 0$	进给 u	$F_2 = F_2 - 2x + 1 = 1 - 2 \times 1 + 1 = 0$ $x = 1 - 1 = 0$，$y = 5$



(a)



(b)



(c)

图 3.3-50 上顶和下底图形轨迹

（1）上顶下底图形轨迹分析

1）P 底轨迹是电极丝下端点轨迹，受控于电极丝平动量（指 $x\&y$ 大滑板的运动），它与电极丝的倾斜量无关，不受倾斜量的干扰，图 3.3-50 所示运动轨迹为 $r+L$，这里"L"为端面偏移量，带有符号，当上小下大时 r 与 L 同向，上大下小时 r 与 L 相位差 180°。

2）P 顶轨迹是指上丝架电极丝上顶点轨迹，由于受机械结构条件决定，它的轨迹的形成应是电极丝的平动量和倾斜量的合成，因此当 P 顶轨迹运动时，平动与倾斜量进给输出分配必须满足上顶轨迹插补进给需要。平动与倾斜输出



不能同时输出，因为是步进的关系。P 顶运动轨迹半径应满足于 $r+l$ 的条件，这里 l 为倾斜半径带符号。当上小下大时，l 与 r 同向，当上大下小时 l 为 r 的反向。在上小下大条件下，当 $l>(r+L)$ 时，上顶合成的运动方向与（$r+L$）方向相反；当 $l<(r+L)$ 时，上顶合成的运动方向与（$r+L$）方向相同。同样可推得，在上大下小条件下，当 $(r-L)>l$ 时，上顶与下底同向；当 $r-L<l$ 时，上顶与下底轨迹方向相反。上顶与下底运动方式如图 3.3-51 所示。

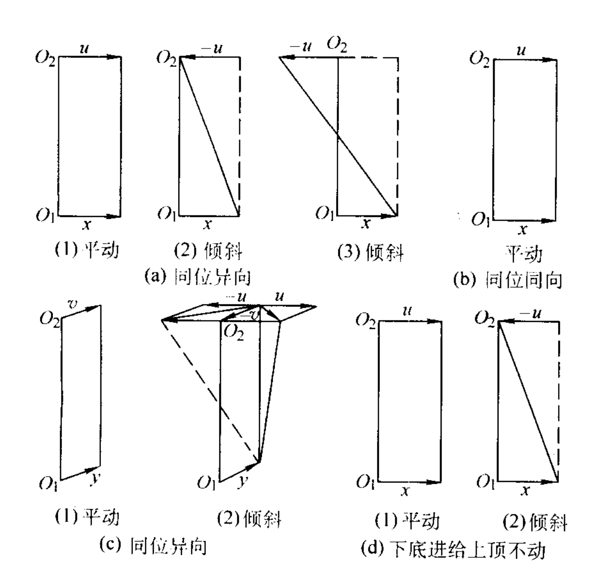


图 3.3-51　上顶与下底运动示意图

3）P 底轨迹与 P 顶轨迹进行比例联动插补，应采用上下二轨迹各自投影分量总和按比例分配。进行插补，获得各自的插补运算（包括直线和圆弧），应当指出的二比例参数：$\sum R_b$ 指下底 $r+L$ 平动轨迹在 x 和 y 轴投影总和，$\sum l_t$ 指上顶 $r+L+l$ 平动加倾斜轨迹投影总和，以 $\sum R_b$ 与 $\sum l_t$ 按比例联动实现相应的进给。

4）上顶轨迹是依照 $u\&v$［上顶（$r+L+l$）］轨迹插补，废除传统简单以平动轨迹 $x\&y$，与倾斜轨迹 $l_x\&l_y$ 输出叠加生成上顶轨迹。小滑板 l_x、l_y 倾斜量仅作为终点判别依据。

（2）在比例法联动插补时如何处理上顶轨迹的进给量

在进行 R_b-l_t 比例插补，当 $R_b \geq l_t$，参照 3.4 节 R_b-l_t 取法作 $R_b-l_t \to A$，$l_t \to B$，以 A、B 作比例插补依据。

1）当仅进行 P 底运算和插补，由前分析，进给采用平动方法，使 P 顶也跟着进给一步，而这一步对 P 顶而言是不允许产生的，因此必须在 P 顶用相应的小滑板 l_x 或 l_y 轴朝相反方向进给一步，用以抵消平动进给在 P 顶产生位移，实现了 P 底进给一步，而 P 顶不动。

2）当比例插补需 P 顶 P 底同时要运算和进给，此时应考虑如下问题。

① 在 P 顶、P 底轨迹为同方向条件下运算和进给。

a）P 顶、P 底同时实行各自的插补运算和进给，当各自进给方位不同时，在 P 顶除实行本次进给，还应执行与 P 底相应的轴反向进给一步，用以抵消 P 底平动在 P 顶产生不应有的进给。

b）各自进给方位相同时，P 顶、P 底各自运算一次，P 顶 P 底进给由 P 底进给一步来完成（可理解成 P 顶、P 底各自进给一步）。

② P 顶 P 底轨迹方向相反条件下，运算和进给的处理　由于方向相反，当 P 底进给一步，而 P 顶也应走一步，由于要抵消 P 底走一步，故而 P 顶要连续走二步，一步是抵消 P 底进给，二步才是 P 顶进给，达到 P 顶 P 底各自朝相反方向进给一步目的。

（3）P 底、P 顶轨迹插补步骤

1）$\sum R_b$、$\sum l_t$ 获得。取出要切割 G 代码指令，换算成上顶下底二轨迹插补要用数据。

如 G01，xa　yb　uc　vd　这是直线型，a、b 分别表示 P 底的直线投影，在 x 轴为 a，y 轴上为 b；c、d 表示 P 顶投影，u 轴为 c，v 轴为 d，c 表示大滑板 x 和小滑板 l_x 合成量，d 表示大滑板 y 和 l_y 合成量。作 $\sum R_b=a+b$，$\sum l_t=c+d$

G02　xa　yb　Ii　Jj　uc　vd 顺圆指令，a、b 表示 P 底（大滑板）终点对起点坐标，求得起点坐标 x_1y_1，终点坐标 x_2y_2，c、d 表示 P 顶（大小滑板合成轨迹）终点对起点坐标，求得 P 顶起点坐标 u_1v_1，终点坐标 u_2v_2。

根据 G02 指令定义 I、J 是 P 底平面的圆心，它也是 P 顶图形的圆心（注：在上下异形加工时，采用图形线性化，为直线指令，无圆指令；在锥度加工时，上下轨迹为同心圆等距图形。）

$\sum R_b$ 为 P 底 x_1y_1 运动至 x_2y_2 在 x、y 轴上各自投影总和（绝对值）。

$\sum l_t$ 为 P 顶 u_1v_1 运动至 u_2v_2 在 u、v 轴上各自投影总和（绝对值）。

G03　xa　yb　Ii　Jj　uc　vd 逆圆指令，$\sum R_b$、$\sum l_t$ 取法同顺圆。

2）同前述，当 $\sum R_b>\sum l_t$，P 底作连续运算和进给，P 顶则根据比例插补函数 G 来决定进行运算和进给，因此可作 $\sum R_b-\sum l_t=A$，$\sum l_t=B$，比例插补依此二值决定 P 顶 P 底运算进给的联动。

需要注意的是：当 $\sum R_b<\sum l_t$，则 P 顶作连续运算和进给，而 P 底则应根据 G 比例插补来决定运算和进给。

比例联动插补 $\sum R_b>\sum l_t$ 时，当仅运算进给 $\sum R_b$（极丝平动），P 顶不作轴迹插补运算，但小滑板朝相应大滑板进给的反方向进给一步，用以抵消平动造成 P 顶的位移。

3）当 $\sum l_t>\sum R_b$ 时，P 底不进给也不作插补运算，因为 P 顶运动不影响 P 底位移。

4）当 P 顶 P 底同时运算和进给应考虑以下三种情况。

① 当 P 底 P 顶进给方位不一致时（指 P 底进给 Δx，P 顶进给 Δv 或 P 底进给 Δy，P 顶进给 Δu），P 底照常运算和进给，P 顶按 u、v 插补运算，进给须注意，在相应轴进给一步，作抵消 P 底进给（平移）产生位移，同时在另一根轴进给一步，以符合当前运动的轨迹。

② 当 P 底 P 顶进给方位一致，相位差 0°时，P 底作运算和进给，P 顶作运算，但不进给（因平移使上顶下底一起进给）。

③ 当 P 底 P 顶进给方位一致，相位差 180°时，P 底作运算和进给，P 顶作运算，进给相应一步抵消 P 底进给，同时设置连续标志 $m=a$（a 为 1，2，3，4）分别表示下次进给小滑板轴方位和方向为 l_x，$-l_x$，l_y，$-l_y$。在下一次插补运算时，先判连续标志 m，如果 $m=a$（指 1，2，3，4），则按 m 值朝相应的方向进给一步，依此成为上一次运动轨迹。这种做法主要是为防止连续进给二次造成的步进电机失步。

④ 采用上下线架图形比例插补四轴联动方法，对锥度加工（包括圆弧直线）、上下异形加工，都可以用统一的 G 指令格式进行切割加工，而比例联动插补的 R_b 与 l_t 也是以二平面的投影总和作为依据，在自动编程中，可方便计算出 x、y、u、v 值，阅读 G 指令可直接计算，完成切割加工。表 3.3-20 为上顶下底比例插补表。

表 3.3-20 上顶下底比例插补表

比例插补		$\sum R_b > \sum l_t$		$\sum R_b < \sum l_t$	
G		下底	上顶	下底	上顶
$G<0$		进给 Δx（Δy）偏差 F_1 插补运算	l_y（l_x）反向进给抵消 Δx（Δy） 不运算	不进给 不运算	进给 l_x（l_y） 偏差 F_2 插补运算
$G\geq0$	异位	进给 Δx（Δy）偏差 F_1 插补运算	l_y（l_x）反向进给抵消 Δx（Δy） 进给另一轴偏差 F_2 运算	进给 Δx（Δy） 偏差 F_1 插补运算	1）l_y（l_x）反向进给抵消 Δx（Δy） 2）进给另一轴 偏差 F_2 运算
	同位同向	进给 Δx（Δy）偏差 F_1 插补运算	不进给 偏差 F_2 插补运算	进给 Δx（Δy） 偏差 F1 插补运算	不进给 偏差 F_2 插补运算
	同位异向	进给 Δx（Δy）偏差 F_1 插补运算	l_y（l_x）进给一步抵消 Δx（Δy） F_2 偏差运算，连续标志 $m=a$，下一次跳过 G 比例插补比较，直接进给 a 值对应的轴	进给 Δx（Δy） 偏差 F_1 插补运算	l_y（l_x）进给一步抵消 Δx（Δy） F_2 偏差运算，连续标志 $m=a$，下一次跳过 G 比例插补比较，直接进给 a 值对应的轴

注：1. G 为比例插补判别式。
2. F_1 为下底轨迹偏差判别式；Δx（Δy）大滑板二轴。
3. F_2 为上顶轨迹偏差判别式；l_x（l_y）小滑板二轴。
4. 同位指二平面相对应轴 $\Delta x \leftrightarrow l_x$ $\Delta y \leftrightarrow l_y$；异位指二平面非对应轴。
5. 上顶平面插补进给，由 Δx，Δy，l_x，l_y 根据轨迹位置步进输出，满足逐点进给要求。

4 程序格式及编程方法

4.1 程序格式

线切割程序格式有 ISO、EIA、3B、4B 等多种方法，我国以往使用较多的是 3B 和 4B 格式，近几年我国高速走丝线切割发展很快，已有很多制造生产厂都在推广使用 ISO 等程序格式，以便与国际接轨。ISO 等程序格式已越来越多为用户所接受。

（1）ISO 代码

线切割机床在进行加工以前，必须按照加工图纸编制加工程序，所编制的程序必须符合下列规则：

ISO 代码有 G 功能码 .M 功能码等；

每一程序行只允许含一个代码；

程序行开始可标记行号，系统可不对行号检查，仅作为用户自己的标记；

程序起始行（G92）必须位于其他所有行（不包括注释行）之前；

每一个程序必须含结束行（M02），结束行以下的内容系统将被忽略。

下面对上述各项规则给予详细的解释。

1）G 功能码　移动类代码同步一行代码相同时可省略，除暂停类代码以外其余各类代码全程有效，直至被同类代码取代为止。

① 移动类

G01 直线插补指令　格式　G01 Xx Yy

以加工速度从起点运行至终点；x，y 为直线终点坐标。

G02 顺时针圆弧插补指令　格式　G02 Xx Yy Ii Jj

以加工速度从起点运行至终点；x，y 为终点坐标，不论在绝对还是相对编程方式中；I J 都为圆心相对起点坐标（I，J 为相对坐标，使用较普遍）。

G03 逆时针圆弧插补指令　格式　G03 Xx Yy Ii Jj

图 3.3-52 中加工 AB 直线段的程序为：

绝对坐标编程方式（G90）

G01　x4500　y3500

相对坐标编程方式（G91）

G01　x - 1000　y3000

式中 - 1000　3000 是直线终点对起点的相对坐标。

加工图 3.3-53 中的 AB 圆弧段的程序为：

绝对坐标编程方式

G03　x4500　y3500　I - 5000　J0

相对坐标编程方式

G03　x - 1000　y3000　I - 5000　J0

式中 - 1000　3000 是圆弧终点对起点的相对坐标。

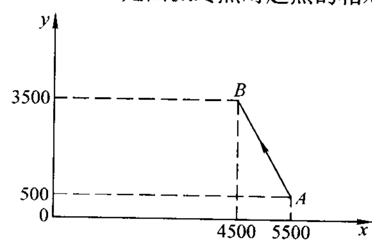


图 3.3-52　直线插补程序

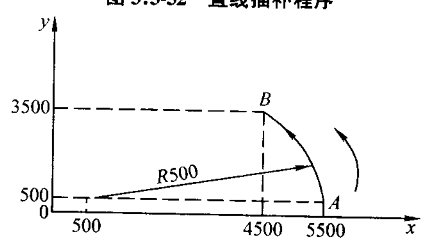


图 3.3-53　圆弧插补程序



19

② 斜度类

G27 常态加工（无锥度加工）。

格式：G27

G28 A 指加工轨迹以进给的方向为正方向，向左倾斜给定的角度，得到锥体上小下大。

格式：G28　Aa 电极丝右倾

G29 A 指加工轨迹以进给的方向为正方向，向右倾斜给定的角度，得到锥体上大下小。

格式：G29　Aa 电极丝左倾

锥度角度表示 A，其后跟着的数值表示斜度（单面）的角度。如 G28 A 2.000 表示电极丝向左倾斜，A < 0 表示电极丝向右倾斜（参见图 3.3-54）。

箭头为加工轨迹的进给方向，虚线为电极丝倾斜方向。

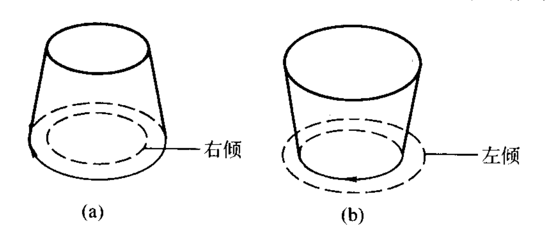


图 3.3-54　极丝倾斜图

③ 偏移类

G40 取消偏移　格式：G40

G41 左偏移，格式：G41　Dd　功能：使偏移轨迹沿加工轨迹方向左偏移 d，其中 d 为间隙补偿量，d 的取值范围：0 ~ 9999 mm，如图 3.3-55a 所示。

G42 右偏移，格式：G42　Dd　功能：使偏移轨迹沿加工轨迹方向右偏移 d。如图 3.3-55b 所示。

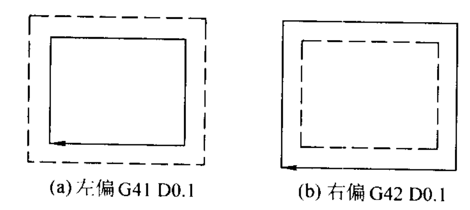


图 3.3-55　箭头为加工轨迹的进给方向，虚线为左右偏轨迹

④ 偏移方式类

G45 相交过渡偏移方式　格式：G45

G46 自动圆弧过渡补偿方式　格式：G46

在一种偏移方式下无法实现时，系统将转换到另一种方式。默认为 G45。如图 3.3-56 所示。

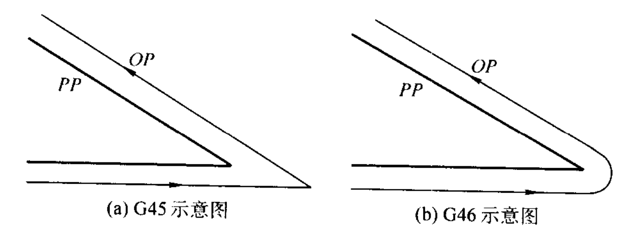


图 3.3-56　PP 编程面轨迹、OP 偏移轨迹

⑤ 编程方式类

G90 绝对坐标编程方式　格式：G90

G91 相对坐标编程方式　格式：G91

⑥ 起点类

G92 定义工件坐标　格式：92 Xx Yy Uu Vv

功能：定义当前点为工件坐标系中（x，y，u，v）点，缺省为（0，0，0，0）。

2）M 功能码

① M00　停止加工。

功能：关脉冲电源，停止加工，按 ENTER 键后系统恢复加工。

② M02　加工结束。

功能：关运丝电机、工作液泵和加工电源，加工结束。

③ M20　开运丝电机、工作液泵和加工电源。

④ M21　关运丝电机、工作液泵和加工电源。

3）线切割用 ISO 代码手工编程实例。

例 1　要加工如图 3.3-57 所示的型孔或凹模，穿丝孔中电极丝中心的坐标为（5，20），按顺时针切割。

① 以绝对坐标方式（G90）输入进行编程，如图 3.3-57a 所示。

```
N0010  G92  x5000     y20000;  给定起始点的绝对坐标
N0020  G01  x5000     y12500;  直线②终点的绝对坐标
N0030       x－5000   y12500;  直线③终点的绝对坐标
N0040       x－5000   y32500;  直线④终点的绝对坐标
N0050       x5000     y32500;  直线⑤终点的绝对坐标
N0060       x5000     y27500;  直线⑥终点的绝对坐标
N0070  G02  x5000  y12500  I－7500;  x、y 之值为顺圆弧⑦终点绝对坐标，I、J 之值为圆心对起点的相对坐标
N0080  G01  x5000     y2000;   直线⑧终点的绝对坐标
N0090  M02;                    程序结束
```

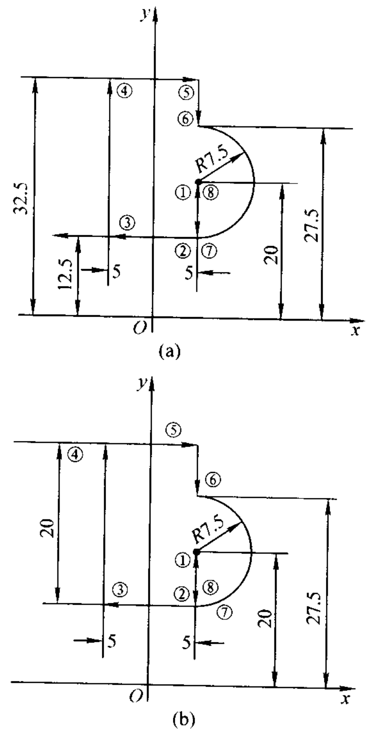


图 3.3-57　ISO 代码编程实例

② 以增量（相对）坐标方式（G91）输入编程，参见图 3.3-57b。

```
N1  G92  x5000  y20000
N2  G01  x0  y－7500
N3       x－10000  y0
N4       x0  y20000
N5       x1000  y0
N6       x0  y－5000
N7  G02  x0  y－15000  I0  J－7500
N8  G01  x0  y7500
```



N9　M02

从上面例子可以发现，采用增量（相对）坐标方式输入程序的数据可简短些，但必须先算出各点的相对坐标值。

例2　如图3.3-58所示图形，用增量（相对）坐标方式输入，可编程序如下：加工起点为（0，30），顺时针方向切割。

```
N1   G92  x0      y30000
N2   G01  x0      y10000
N3   G02  x10000  y-1000   I0      J-10000
N4   G01  x0      y-20000
N5        x20000  y0
N6   G02  x0      y-20000  I0      J-10000
N7   G01  x-40000 y0
N8        x0      y40000
N9   G02  x1000   y10000   I10000  J0
N10  G01  x0      y-10000
```

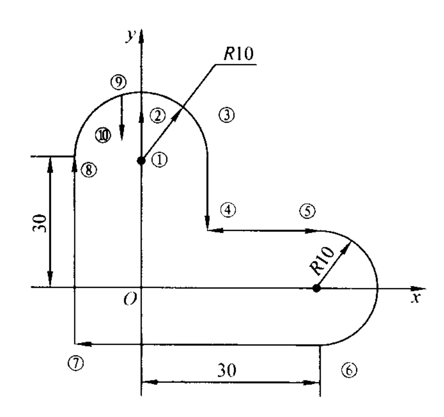


图3.3-58　编程图形

以上简单介绍高速走丝电火花线切割机使用的部分ISO指令。应当指出的是，尽管ISO是国际标准化组织规定的指令集，但其中一些ISO指令代码可以由生产厂自行定义。因此在使用ISO指令时必须认真阅读配套的代码使用说明。

由于上下异形切割以及四轴联动引进，在切割锥度和上下异形时增加二条移动类指令。

四轴联动直线指令　格式：G01　Xx　Yy　Uu　Vv

x、y为线架电极丝底端运动的终点坐标或终点对起点坐标。

u、v为电极丝顶端平动（x轴、y轴）和倾斜（小滑板l_x轴、l_y轴）运动合成形成的轨迹点，合成轨迹终点的坐标由此知，小滑板终点坐标：$l_x = u - x$　$l_y = v - y$。

在锥度切割圆弧加工中也可以使用四轴联动圆弧指令，对于顺、逆圆弧锥度加工，其指令格式分别为：

G02 Xx Yy Ii Jj Uu Vv

G03 Xx Yy Ii Jj Uu Vv

同样，与四轴联动直线指令相同，u、v是平动x、y和倾斜l_x、l_y运动合成形合的轨迹点，电极丝下端终点坐标x、y，I、J是相对起点的圆心坐标，l_x、l_y是小滑板作倾斜后的终点坐标或终点对起点坐标。

（2）3B程序格式

3B程序格式如表3.3-21所示。

表3.3-21　3B程序格式

B	x	B	y	B	J	G	Z
	x坐标值		y坐标值		计数长度	计数方向	加工指令

表中的B称之为分隔符，它在程序单上起着把x、y和J数值分隔开的作用。当程序输入控制器时，读入第一个B后，它使控制器做好接受x坐标值的准备，读入第二个B后做好接受y坐标值的准备，读入第三个B后做好接受J值的准备。加工圆弧时，程序中的x、y必须是圆弧起点相对其圆心的坐标值。加工斜线时，程序中的x、y必须是该斜线段终点相对其起点的坐标值，斜线段程序中的x、y值允许把它们同时缩小相同的倍数，只要其比值保持不变即可。对于与坐标轴重合的线段，在其程序中的x或y值，均不必写出0。

1）计数方向G和计数长度J

①计数方向G及其选择　为保证所要加工的圆弧或线段能按要求的长度加工出来，一般线切割机床是通过控制从起点到终点某个进给的总长度来达到的。因此在计算机中设立一个J计数器进行计数。即将加工该线段的滑板进给总长度J数值，预先置入J计数器中。加工时当被确定为计数长度这个坐标的滑板每进给一步，J计数器就减1。这样，当J计数器减到零时，则表示该圆弧或直线段已加工到终点。在x和y两个坐标中用哪个坐标作计数长度J呢？这个计数方向的选择要依图形的特点而定。

加工斜线段时，必须用进给距离比较长的一个方向作进给长度控制。若线段的终点为A（x_e，y_e），当$|y_e|>|x_e|$时，计数方向取G_y（见图3.3-59）；当$|y_e|<|x_e|$时，计数方向取G_x（见图3.3-60）。当确定计数方向时，可以45°为分界线（见图3.3-61），当斜线在阴影区内时，取G_y，反之取G_x。若斜线正好在45°线上时，理论上应该是在插补运算加工过程中，最后一步走的是哪个坐标，则取该坐标为计数方向。从这个观点来考虑，Ⅰ、Ⅲ象限应取G_y，Ⅱ、Ⅳ象限应取G_x，才能保证加工到终点。

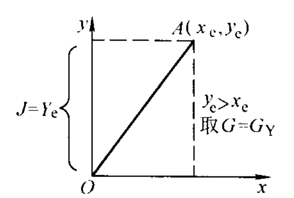


图3.3-59　取G_y

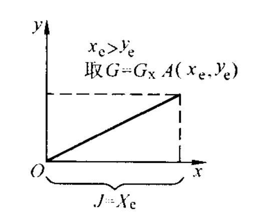


图3.3-60　取G_x

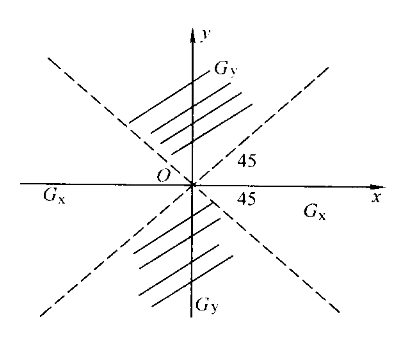


图3.3-61　斜线段计数方向的选取



圆弧计数方向的选取，应看圆弧终点的情况而定。从理论上来分析，应该是当被加工圆弧达到终点时，走最后一步的是哪个坐标，就应选该坐标作计数方向；也可以 45°线为界（见图 3.3-62），若圆弧终点坐标为 $B(x_e, y_e)$，当 $|x_e|<|y_e|$ 时，即终点在阴影区内，计数方向取 G_x；当 $|x_e|>|y_e|$ 时，计数方向取 G_y；当终点在 45°线上时，不易准确分析，按习惯任取。

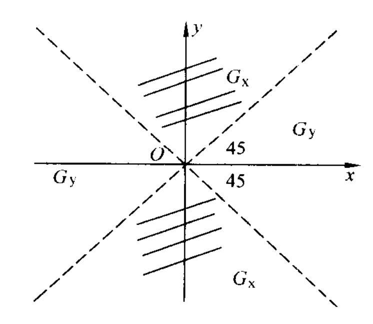


图 3.3-62　圆弧计数方向的选取

② 计数长度 J 的确定　当计数方向确定后，计数长度 J 应取计数方向从起点到终点滑板移动的总距离，即圆弧或直线段在计数方向坐标轴上投影长度的总和。计数长度 J 在加工过程中用来作为终点判别的重要参数，即每在计数轴电方向上进给一步就减 1，若此轴的 J 计数减至零，则表示该段程序结束，准备进入另一程序段的加工或退出加工。

对于斜线，如图 3.3-60 所示，取 $J=x_e$ 即可。

对于圆弧，它可能跨越几个象限，如图 3.3-63 和图 3.3-64 所示的圆弧都是从 A 加工到 B。图 3.3-63 为 G_x，$J=J_{x1}+J_{x2}$；图 3.3-64 为 G_y，$J=J_{y1}+J_{y2}+J_{y3}$。

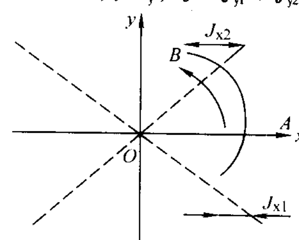


图 3.3-63　跨越两个象限

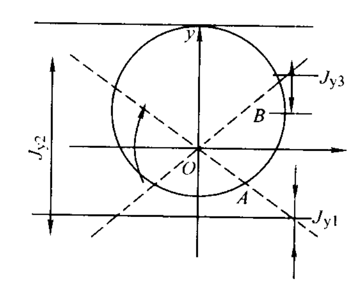


图 3.3-64　跨越四个象限

③ 加工指令 Z　Z 是加工指令（见图 3.3-65）代号，它共分 12 种。其中直线加工指令有 4 种，圆弧加工指令有 8 种。

SR 表示顺圆，NR 表示逆圆，字母后面的数字表示该圆弧的起点所在象限，如 SR1 表示起点在第一象限的顺圆弧。直线段的加工指令用 L 表示，L 后面的数字表示该线段所在的象限。对于与坐标轴平行的直线段，正 x 轴为 L1，正 y 轴为 L2，负 x 轴为 L3，负 y 轴为 L4。

2）编程实例　在程序中 x、y 和 J 的值用微米（μm）表示，一般最多为 6 位数。

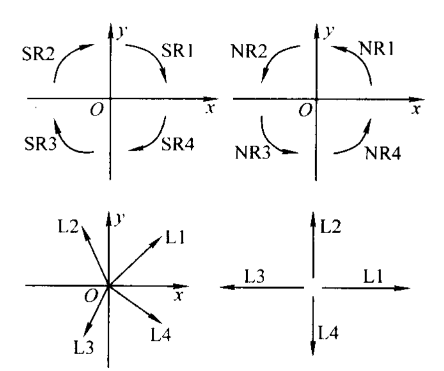


图 3.3-65　加工指令

例 1　加工图 3.3-66 所示的斜线段，终点 A 的坐标值为：$x=17$ mm，$y=5$ mm，其程序为：

B17000　B5000　B17000　Gx L1

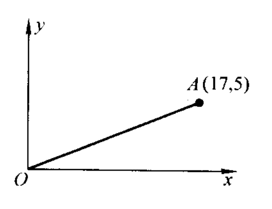


图 3.3-66　加工斜线

例 2　图 3.3-67 所示的直线段与正 y 轴平行，长度为 22.4 mm，其加工程序为：

BBB22400GyL2

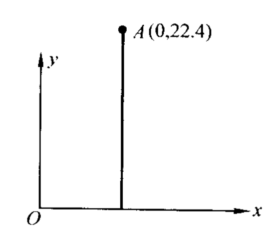


图 3.3-67　加工与 y 轴平行的直线

在与坐标轴平行的程序中，x 或 y 的数值即使不为零，也不必写出。

例 3　加工图 3.3-68 的圆弧，A 为此逆圆弧的起点，B 为其终点。A 点坐标 $x_a=-2$ mm，$y_a=9$ mm，因终点 B 靠近 x 轴，应取 G_y，计数长度取圆弧在各象限内的弧长在计数方向 y 轴上的投影之总和。

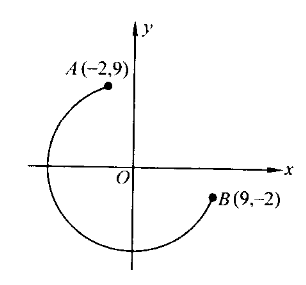


图 3.3-68　加工跨越三个象限的圆弧

圆弧 AC 在 y 轴上的投影为 $J_{y1}=9$ mm，

圆弧 CD 的投影为 $J_{y2}=$ 半径 $=\sqrt{2^2+9^2}=9.22$ mm，$DB=$ 半径 $-2=7.22$ mm。

因此，其计数长度 $J=J_{y1}+J_{y2}+J_{y3}=9+9.22+7.22=25.44$ mm。



圆弧的起点在第二象限，加工指令取 NR2，故其加工程序为：

B2000B9000B25440GyNR2

3）3B指令中J计数不足及避免方法　在直线中采用J计数的办法，可以很好地完成对终点的控制，但在圆弧中，J计数的方法就存在着明显的不足。因为在编写圆弧3B指令代码时，J计数轴是依照终点坐标 x 和 y 的绝对值大小而定，当 $|x|<|y|$ 时取 x 轴，反之记 y 轴。如图3.3-69所示，圆弧沿顺圆方向从 A 行至 B，很明显，终点 B 的坐标中 $|x|<|y|$，故取 x 轴为J计数轴，根据插补轨迹，终点 B 可能落在圆外也可能在圆内，下面分两种情况讨论：当终点为图中 B 点在圆外，即 $\sqrt{x_2^2+y_2^2}>R$，此时根据计数规则，最后一步走至（x_2，y_2）后计数长度减至为零，与终点吻合；当终点为图中 B' 点在圆内，即 $\sqrt{x_2^2+y_2^2}<R$，由于计数规则，程序走至 B（x_2，y_2）时，计数长度已减至为零，即该程序段退出，故程序无法到达终点 B'，存在一定的误差。如果加工程序段类似这种情况较多，且控制是开环式的，则将产生较大的累积误差，最终造成工件报废。为避免这种累积误差，在输入3B指令的同时亦将终点坐标输入 x，在利用一般J计数判别规则之后，再判别终点坐标是否到位，若已到位则退出，若不到位，则强制进给另一轴，这样便可保证加工该程序段的结束点与真正的终点吻合，能较好地消除偏差。

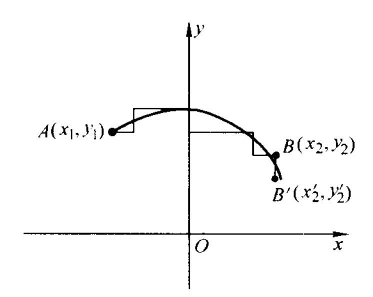


图 3.3-69　圆弧加工J计数的特殊情况

4）4B程序格式　4B有几种书写格式，这里举出其中一种：

$$\pm R_M \text{BxByBjGz}$$

即在程序段中引入 $\pm R_M$ 参数，这样，可以利用原3B指令自动进行间隙补偿和锥度切割加工。其中"+"、"−"号的设定为："+"号表示顺圆顺线，"−"号表示逆圆逆线。R_M 的计算见本章2.2节。如果是圆弧加工的3B指令，则 R_M 为圆的半径绝对值，符号"+"为顺圆，符号"−"为逆圆，并可省略 $\pm R_M$；如果是直线加工的3B指令，如图3.3-70所示，箭头所示"顺"取"+"，"逆"取"−"，它与圆的顺、逆方向一致。由式（3.3-32）得：

$$R_M=\frac{l}{f_1\cot\frac{\alpha}{2}+f_2\cot\frac{\beta}{2}}=\frac{20\ 000}{-\cot15°+\cot10°}$$

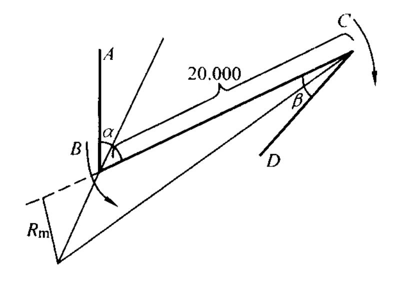


图 3.3-70　R_m 取法示意图

这类线切割机床一般都设有下列标志：

顺	凹	锥
（顺圆线）键	间隙正负补偿	锥度上大下小（上小下大）键

三键与 $\pm R_M$ 组合，计算机可自动进行间隙及斜度切割计算。

4.2　基本编程方法

（1）编程的数学基础

1）坐标系

① 直角坐标系（见图3.3-71）　x 轴和 y 轴的交点 O 为坐标原点。x 轴由原点向右为正，向左为负。y 轴由原点向上为正，向下为负。x 轴和 y 轴把平面划分为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ四个象限，在每个象限中 x 和 y 的正负如图所示。

② 极坐标系（见图3.3-72）　基点 O 为极点，基线 Ox 为极轴。OP 为 P 点的矢径（极径），以 ρ 表示。$\angle xOP$ 为 P 点的幅角（极角），以 θ 表示，θ 角的正负由矢径的运动方向确定。逆时针方向为正 θ，顺时针方向为 $-\theta$。

③ 极坐标与直角坐标的关系（见图3.3-73）　P 点的位置在极坐标系中由 ρ 和 θ 确定，在直角坐标系中由 x、y 确定。它们之的相互关系为

$$x=\rho\cos\theta \quad y=\rho\sin\theta \quad \rho^2=x^2+y^2 \qquad (3.3\text{-}77)$$

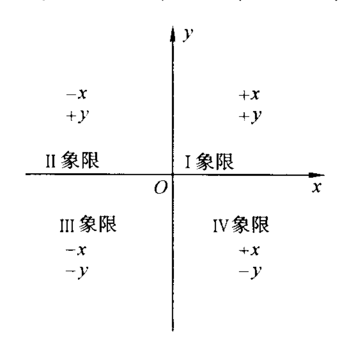


图 3.3-71　直角坐标系

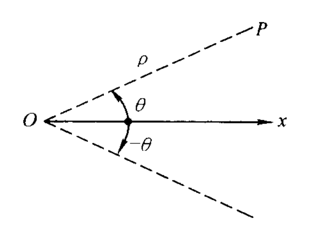


图 3.3-72　极坐标系

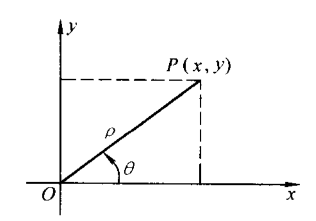


图 3.3-73　极坐标与直角坐标的关系

2）坐标变换

① 坐标移轴（见图3.3-74）　当坐标原点 O 移至 O' 处时，P 点时对 O 的坐标（x、y）与 P 点对 O' 的坐标（x'，y'）之间的变换关系为

$$\begin{aligned}x&=x'+h\\y&=y'+k\end{aligned} \quad 或 \quad \begin{aligned}x'&=x'-h\\y'&=y'-k\end{aligned} \qquad (3.3\text{-}78)$$

② 坐标轴旋转（见图3.3-75）　当坐标系 xOy 的 x 轴



和 y 轴以原点 O 为圆心旋转 α 角，成为 $x'Oy'$ 坐标系，此时 P 点的坐标（x，y）与（x'，y'）的变换关系为

$$\begin{aligned} x &= x'\cos\alpha - y\sin\alpha \\ y &= x'\sin\alpha + y'\cos\alpha \\ x' &= y\sin\alpha + x\cos\alpha \\ y' &= y\cos\alpha - x\sin\alpha \end{aligned} \tag{3.3-79}$$

式中，α 以 x 轴的正向作为度量基准，逆时针旋转时 α 取正，顺时针旋转时 α 取负。

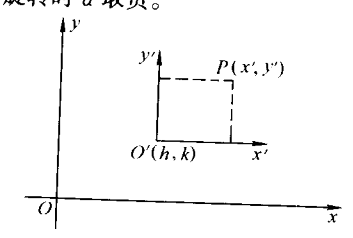


图 3.3-74　直角坐标移轴变换

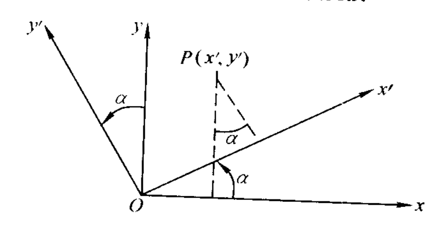


图 3.3-75　直角坐标旋转

③ 点旋转（见图 3.3-76）　在 xOy 坐标系中，点 A（x_A，y_A）旋转 φ 角至点 B（x_B，y_B），点 B 的坐标可用下式计算

$$\begin{aligned} x_B &= x_A\cos\varphi - y_A\sin\varphi \\ y_B &= x_A\sin\varphi - y_A\cos\varphi \end{aligned} \tag{3.3-80}$$

式中，逆时针旋转时 φ 角取正，顺时针旋转时 φ 角取负。

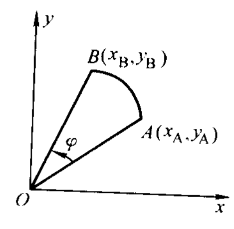


图 3.3-76　点旋转

（2）函数

1）三角函数的基本关系和符号见图 3.3-77。

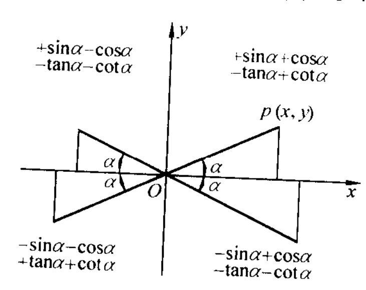


图 3.3-77　三角函数基本关系和符号

$$\sin\alpha = \frac{y}{T} \qquad \cos\alpha = \frac{x}{T} \qquad \tan\alpha = \frac{y}{x} = \frac{\sin\alpha}{\cos\alpha} \tag{3.3-81}$$

$$y = T\sin\alpha \qquad x = T\cos\alpha \qquad T = \sqrt{x^2 + y^2}$$

2）锐角三角函数与任意三角函数的关系

① 锐角与任意角在直角坐标系中的关系如图 3.3-78 所示。

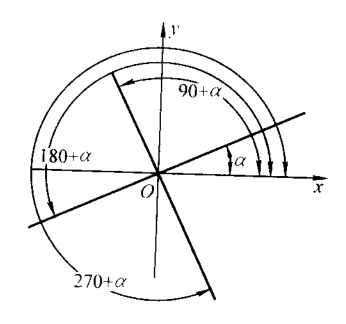


图 3.3-78　锐角与任意角的关系

② 锐角与任意角的三角函数关系及符号变换，列于表 3.3-22 中。

（3）编程常用三角计算公式

在进行简单图形的编程计算时，往往需要找出有关的角度关系。使用三角计算公式，即可计算出所要求的点或交点及切点的坐标（见表 3.3-22）。

表 3.3-22　锐角与任意角的三角函数关系及符号变换

角（θ 为锐角）	函数			
	sin	cos	tan	cot
$-\theta$	$-\sin\theta$	$\cos\theta$	$-\tan\theta$	$\cot\theta$
$90° - \theta$	$\cos\theta$	$\sin\theta$	$\cot\theta$	$\tan\theta$
$90° + \theta$	$\cos\theta$	$-\sin\theta$	$-\cot\theta$	$-\tan\theta$
$180° - \theta$	$\sin\theta$	$-\cos\theta$	$-\tan\theta$	$-\cot\theta$
$180° + \theta$	$-\sin\theta$	$-\cos\theta$	$\tan\theta$	$\cot\theta$
$270° - \theta$	$-\cos\theta$	$-\sin\theta$	$\cot\theta$	$\tan\theta$
$270° + \theta$	$-\cos\theta$	$\sin\theta$	$-\cot\theta$	$-\tan\theta$
$360° - \theta$	$-\sin\theta$	$\cos\theta$	$-\tan\theta$	$-\cot\theta$

1）求圆上某点坐标的公式（见图 3.3-79）

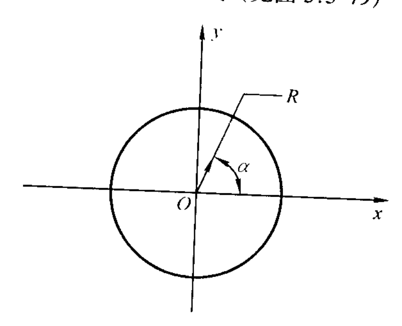


图 3.3-79　圆上点的坐标

$$\begin{aligned} x_A &= R\cos\alpha \\ y_A &= R\sin\alpha \end{aligned} \tag{3.3-82}$$

A（x_A，y_A）点至圆心的半径为 R，α 为半径 R 与 x 坐标轴的正向夹角。在某些情况下，α 角直接在零件图上找不到。下面介绍在某些条件下计算 α 角的公式。

① 某直线与圆弧相切于 A 点，且与 x 轴的正向夹角为 β，则

$$\alpha = \beta \pm 90° \tag{3.3-83}$$

式中，β 顺时针方向为负，逆时针方向为正（见图 3.3-80）。

② 过某定点 P（a，b）的直线与圆相切（见图 3.3-81），则

$$\alpha = \arctan\frac{b}{a} \pm \arccos\frac{R}{\sqrt{a^2 + b^2}} \tag{3.3-84}$$

式中，R 为已知圆半径。

在图 3.3-80 和图 3.3-81 中，若直线切于已知圆的上半

部时，公式中的号取“+”，切于圆的下半部时取“-”。

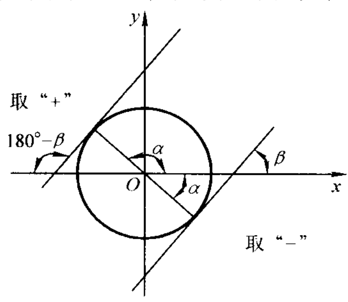


图 3.3-80　具有 β 角的斜线与圆相切

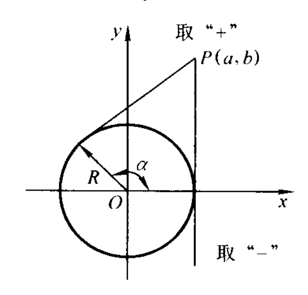


图 3.3-81　过某定点的直线与圆相切

2）两相切圆的圆心连线与 x 轴的正向夹角（见图 3.3-82）

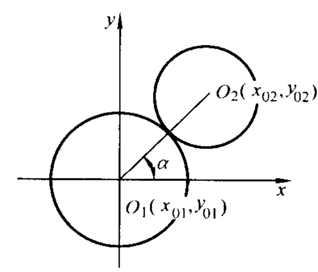
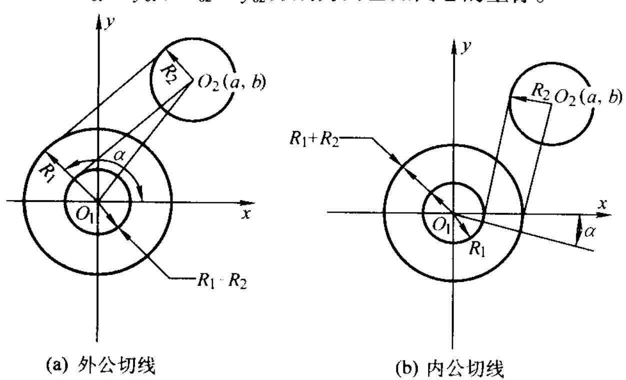


图 3.3-82　两相切圆的圆心连线与 x 轴的正向夹角

$$\alpha = \arctan\frac{y_{02}-y_{01}}{x_{02}-x_{01}} \qquad (3.3\text{-}85)$$

式中，x_{01}、y_{01}，x_{02}、y_{02} 分别为两已知圆心的坐标。



(a) 外公切线　　(b) 内公切线

图 3.3-83　两圆公切时的角

3）两圆公切线与圆的切点和圆心的连线与 x 轴正向的夹角（见图 3.3-83）：

$$\alpha = \arctan\frac{b}{a} \pm \arccos\frac{R_1 \pm R_2}{\sqrt{a^2+b^2}} \qquad (3.3\text{-}86)$$

式中，$R_1 \pm R_2$：外公切线取“-”号，内公切线取“+”号；另一组号，若公切点在圆的上半部时取“+”，在圆的下半部时取“-”。

4）两圆相交时，交点和主圆心连线与 x 轴的正向夹角（见图 3.3-84）：

$$\alpha = \arccos\frac{T^2+R_1^2-R_2^2}{2TR_1} + \arctan\frac{b}{a} \qquad (3.3\text{-}87)$$

式中，T 为两圆圆心连线。当两圆相切时，$T = R_1 + R_2$，此时，上式中的第一项为零，使该式的含义与两圆相切时相同。

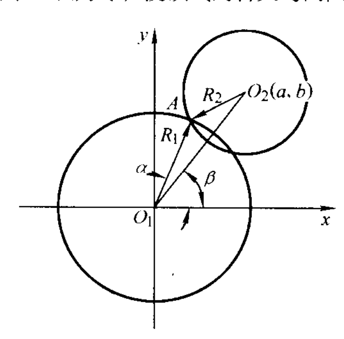


图 3.3-84　两圆相交时的 α 角

（4）典型化编程法

线切割加工的图形各式各样，对具体图形寻找具体求解方法比较费事。典型化编程法可把各式各样的图形分解为直线和圆弧的典型组合，将工件上给出的几何尺寸转换为典型的已知条件，然后代入相应的典型公式，计算出交点坐标，再编出线切割程序。典型化编程包括：图形典型化、条件典型化和运算典型化。

1）图形典型化　图形典型化的思路是，各种各样的图形都可分解为直线和圆弧两个几何元素。对于渐开线、双曲线、抛物线、摆线等曲线，虽不能直接分解为直线和圆弧，但可以用一系列的直线和圆弧逼近它。由直线和圆弧构成交点的几何图形共有五类，即：①两圆相交；②两圆相切；③圆线相交；④圆线相切；⑤两线相交。两圆相切实际是两圆相交的特殊情况；圆线相切实际是圆线相交的特殊情况。因此，直线和圆弧构成交点的几何图形可归结为三种类型的典型形式，即两圆相交（OO 型）、圆线相交（OL 型）和线线相交（LL 型），如图 3.3-85 所示。

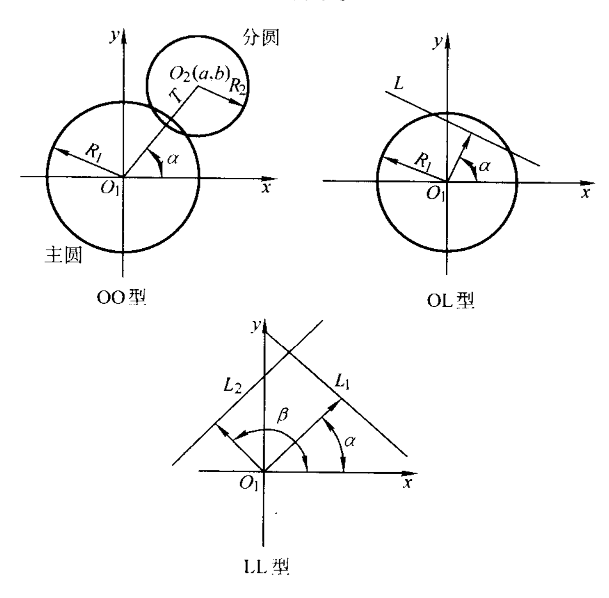


图 3.3-85　由直线和圆构成交点的三种典型形式

2）条件典型化　条件典型化的思路是，为了使代入计算交点坐标公式中的条件取最简单的形式，对圆取圆心坐标

(x_i，y_i) 和半径 (r_i)，对直线则取法线式表达的两个数据 (ρ 及 α) 作为典型条件。在计算交点坐标之前，必须把图样上不是典型条件的数据，先转换成典型条件。通常线切割工件图样上给出的数据，圆已是典型条件，而直线往往是以点斜式 (x_C、y_C 和 β) 或两点式 (x_D、y_D、x_C 和 y_C) 的形式表达。因此在带入公式计算前，必须将其转换成法线式的典型条件 (ρ 和 α) 并将其转换成 ρ、$\sin\alpha$ 和 $\cos\alpha$ 的形式。以便直接代入公式计算。

点斜式和两点式直线的非典型条件向法线式直线的典型条件转换公式如表 3.3-23 所示。

表 3.3-23　直线转换公式表

类型	点斜式	两点式
简图	y, $C(x_C,y_C)$, ρ, α, β, O, x	y, $C(x_C,y_C)$, ρ, $D(x_D,y_D)$, α, O, x
已知条件	(x_C，y_C) β	(x_C，y_C) (x_D，y_D)
K	$\tan\beta$	$\dfrac{y_C-y_D}{x_C-x_D}=\dfrac{y_D-y_C}{x_D-x_C}$
Q	y_C-Kx_C	
$\sin\alpha$	$\pm\lvert\cos\beta\rvert$ 与 Q 同号	$\pm\dfrac{1}{\sqrt{K^2+1}}$ 与 Q 同号
$\cos\alpha$	$-K\sin\alpha$	
P	$Q\cos\alpha$	

注：表中 x_i、y_i 为点在直角坐标系中的坐标值，$i=A$、B、C、$D\cdots$；

ρ ——由坐标原点引向直线上任一点的矢量，在该直线的法线上的投影；

α ——法线 P_i 与 x 轴正向之间的夹角；

β ——直线与 x 轴正向之间的夹角；

Q ——直线在 y 轴上的截距；

K ——直线的斜率。

例 1　条件典型化计算实例：点斜式条件转换。

已知：$x_c=-4.3$，$y_c=9.825$，$\beta=114°$。

条件转换计算：

$K=\tan\beta=-2.246\,036\,77$

$Q=y_c-Kx_c=0.167\,041\,87$

$\sin\alpha=\pm\lvert\cos\beta\rvert=0.406\,736\,64$（与 Q 同号）

$\cos\alpha=-K\sin\alpha=0.913\,545\,45$

$P=Q\sin\alpha=0.067\,942\,051$

例 2　两点式条件转换。

已知：$x_C=-11.646\,291\,25$，$y_C=3.6$，$x_D=-10$，$y_D=2.25$

条件转换计算：

$$K=\frac{y_C-y_D}{x_C-x_D}=-0.820\,025\,01$$

$$Q=y_C-Kx_C=-5.950\,251$$

$$\sin\alpha=\pm\left|\frac{1}{\sqrt{K^2+1}}\right|=-0.773\,258\,308\text{（与 }Q\text{ 同号）}$$

$\cos\alpha=-K\sin\alpha=-0.634\,091\,15$

$\rho=Q\sin\alpha=4.601\,081\,128$

3）运算典型化　运算典型化是在图形典型化和条件典型化的基础上，通过数学推导，建立出计算交点坐标的统一公式（典型公式）。它适用于计算线线（LL 型）相交、圆线（OL 型）相交和圆圆（OO 型）相交交点坐标的计算。该公式为

$$x=\frac{\rho_1\sin\alpha_2-\rho_2\sin\alpha_1}{\sin(\alpha_2-\alpha_1)}$$
$$y=\frac{\rho_2\cos\alpha_1-\rho_1\cos\alpha_2}{\sin(\alpha_2-\alpha_1)} \tag{3.3-88}$$

式中，x、y 为所计算的交点坐标值。

在上述统一的典型化公式中，当构成交点的两个几何元素中有一个是圆时（即 OL 型、OO 型），则 $\alpha_2=\alpha_1\pm90°$，此 α_2 之值代入上述公式的分母中，得：

$$\sin(\alpha_2-\alpha_1)=\sin(\alpha_1\pm90°-\alpha_1)=\pm\sin90°=\pm1$$

则可得到简化的另一组计算交点坐标的统一公式

$$x=\rho_1\cos\alpha_1-\rho_2\sin\alpha_1$$
$$y=\rho_1\sin\alpha_1-\rho_2\cos\alpha_1 \tag{3.3-89}$$

当两个几何元素构成相切关系时（即 OL 切型、OO 切型），则 $P_1=r_2$、$P_2=0$，可得到另一组更简化的计算交点的坐标的公式

$$x=r_2\cos\alpha_1$$
$$y=r_2\sin\alpha_1 \tag{3.3-90}$$

在表 3.3-24 中列出了三种典型的交点计算已知条件及计算过程。

4）交点计算实例

① 圆相交（OO 型）交点计算（见图 3.3-86）　已知：主圆半径 $r_2=11$，分圆半径 $r_1=9.25$，分圆心 x 轴坐标值 $x_{01}=10$，y 坐标值 $y_{01}=13$。

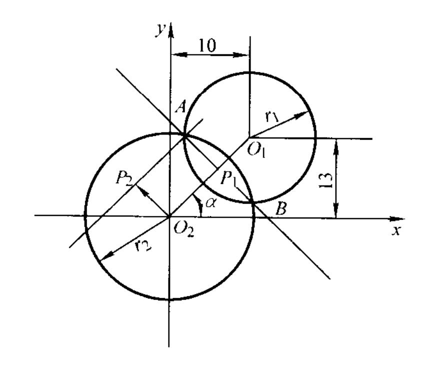


图 3.3-86　圆圆相交交点计算

中间运算。根据表 3.3-24 中圆圆相交的公式计算。

$$T=\sqrt{x_{01}^2+y_{01}^2}=\sqrt{10^2+13^2}=16.401\,219\,47$$

$$\cos\alpha_1=x_{01}/T=10\div16.401\,219\,47=0.609\,710\,76$$

$$\sin\alpha_1=y_{01}/T=13\div16.401\,219\,47=0.792\,623\,989$$

$$\rho_1=\frac{T^2+r_2^2-r_1^2}{2T}=\frac{16.401\,219\,47^2+11^2-9.25^2}{2\times16.401\,219\,47}=9.280\,94$$

$$\rho_2=\pm\sqrt{r_2^2-\rho_1^2}=\pm\sqrt{11^2-9.280\,94^2}=\pm5.904\,585\,876$$

取正值还是负值，要以交点是 A 点（取正）还是 B 点（取负）而定。判别交点是 A 点还是 B 点的方法，是以主圆圆心 O_2 为转动中心，使 T 旋转，T 作逆时针方向旋转时碰到的交点为 A 点，T 作顺时针方向旋转时碰到的交点为 B 点。

计算交点 A 对 O_2 的坐标值（ρ_2 取正值）。

$x_A^{02}=\rho_1\cos\alpha_1-\rho_2\sin\alpha_1=9.280\,94\times0.609\,710\,76-5.904\,585\,876\times0.792\,623\,989=0.978\,573\,173$

$y_A^{02}=\rho_1\sin\alpha_1+\rho_2\cos\alpha_1=9.280\,94\times0.792\,623\,989+5.904\,585\,876\times0.609\,710\,76=10.956\,386\,01$

计算交点 B 对 O_2 的坐标值（ρ_2 应取负值）。

$x_B^{02} = \rho_1 \cos\alpha_1 - \rho_2 \sin\alpha_1 = 9.280\,94 \times 0.609\,710\,76 - (-5.904\,585\,876) \times 0.609\,710\,76 = 10.338\,806$

$y_B^{02} = \rho_1 \sin\alpha_1 + \rho_2 \cos\alpha_1 = 9.280\,94 \times 0.792\,623\,989 + (-5.904\,585\,876) \times 0.609\,710\,76 = 3.756\,206\,926$

② 圆线相交（OL型）交点计算（见图3.3-87、图3.3-88）

已知：圆的半径 $r_2 = 10$，线 L_1 的 $P_1 = 6.9$，$\alpha_1 = 213.667\,46°$

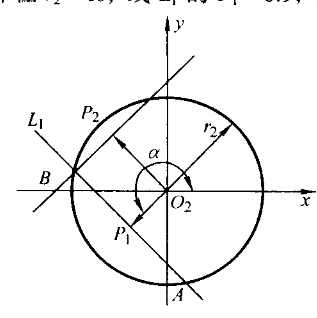


图 3.3-87　圆线相交交点计算

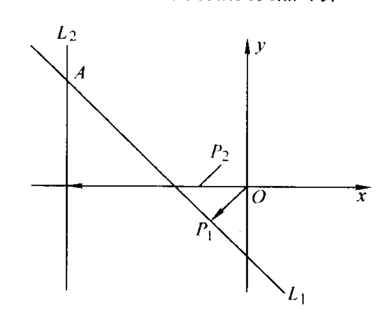


图 3.3-88　线线相交交点计算

中间运算：

$$\sin\alpha_1 = -0.554\,371\,846$$

$$\cos\alpha_1 = -0.832\,269\,1$$

$$\rho_2 = \pm\sqrt{r_2^2 - \rho_1^2} = \pm\sqrt{10^2 - 6.9^2} = \pm 7.238\,093\,672$$

计算交点 A 点（ρ_2 应取正）对 O_2 的坐标值

$x_A^{02} = \rho_1 \cos\alpha_1 - \rho_2 \sin\alpha_1 = 6.9 \times (-0.832\,269\,1) - 7.238\,093\,672 \times (-0.554\,371\,846) = -1.730\,061\,444$

$y_A^{02} = \rho_1 \sin\alpha_1 + \rho_2 \cos\alpha_1 = 6.9 \times (-0.554\,371\,846) + 7.238\,093\,672 \times (-0.832\,269\,1) = -9.849\,207\,45$

计算交点 B 点（ρ_2 应取正）对 O_2 的坐标值：

$x_B^{02} = \rho_1 \cos\alpha_1 - \rho_2 \sin\alpha_1 = 6.9 \times (-0.832\,269\,1) - (-7.238\,093\,672) \times (-0.554\,371\,846) = -9.755\,252\,147$

$y_B^{02} = \rho_1 \sin\alpha_1 + \rho_2 \cos\alpha_1 = 6.9 \times (-0.554\,371\,846) + (-7.238\,093\,672) \times (-0.832\,269\,1) = 2.198\,875\,973$

③ 线线相交（LL型）交点计算（见图3.3-88）　已知：线 L_1 的 $\rho_1 = 4.671\,082$，$\sin\alpha_1 = -0.773\,258$，$\cos\alpha_1 = -0.634\,091$，$L_2$ 的 $\rho_2 = 10.07$，$\sin\alpha_2 = 0$，$\cos\alpha_2 = -1$。

交点计算

$$x_A = \frac{\rho_1 \sin\alpha_1 - \rho_2 \sin\alpha_1}{\sin\alpha_2 \cos\alpha_1 - \cos\alpha_2 \sin\alpha_1} = \frac{4.671\,082 \times 0 - 10.07 \times (-0.333\,258)}{0 \times (-0.634\,091) - (-1) \times (-0.773\,258)} = -10.07$$

$$y_A = \frac{\rho_2 \cos\alpha_1 - \rho_2 \cos\alpha_2}{\sin\alpha_2 \cos\alpha_1 - \cos\alpha_2 \sin\alpha_1} = \frac{10.07 \times (-0.634\,091) - 10.07 \times (-1)}{0 \times (-0.634\,091) - (-1) \times (0.773\,258)} = 2.216\,872\,467$$

表 3.3-24　典型化编程交点坐标计算表

	类型		OO型（两圆相交）		OL型（圆线相交）		LL型（两线相交）	
①典型形式	简图							
	工件轮廓							
	已知条件		O_1	r'_1，$(x_{01},\ y_{01})$	L_1	$(\rho_1,\ \alpha_1)$		
			O_2	Φ_2			L_2	$(\rho_2,\ \alpha_2)$
中间运算	T		$\sqrt{x_{01}^2 + y_{02}^2}$		—			
	$\cos\alpha$		$\frac{x_{01}}{T}$ 或 $\cos\alpha_1$		$\cos\alpha_1$		$\cos\alpha_2$	
	$\sin\alpha$		$\frac{y_{01}}{T}\sin\alpha_1$		$\sin\alpha_1$		$\sin\alpha_2$	
	ρ_{1f}		$\frac{T^2 + (r_2 \pm f)^2 - (r_1 \pm f)^2}{2T}$		$\rho_1 \pm f$			
	ρ_{2f}		$\pm\sqrt{(r_2 \pm f)^2 - P_{1f}^2}$ 交点在 T 的逆钟向一侧（A 点），取正 交点在 T 的顺钟向一侧（B 点），取负 （无 T 当 ρ_1、$\rho_2 = 0$ 时，用 ρ_{3f}）		$\rho_2 \pm f$			



续表 3.3-24

①典型形式	交点坐标	$x_f = P_{1f}\cos\alpha_1 - P_{2f}\sin\alpha_1$ $y_f = P_{1f}\sin\alpha_1 + P_{2f}\cos\alpha_1$		$x_f = \dfrac{P_{1f}\sin\alpha_1 - P_{2f}\sin\alpha_1}{\sin\alpha_2\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2\sin\alpha_1}$ $y_f = \dfrac{P_{2f}\cos\alpha_1 - P_{1f}\cos\alpha_2}{\sin\alpha_2\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2\sin\alpha_1}$
		当两直线正交时，$\sin(\alpha_2-\alpha_1)=\sin\alpha_2\cos\alpha_1-\cos\alpha_2\sin\alpha_1=\pm1$		
求过渡圆圆心坐标	简图			
	几何关系	$r_1 = r'_1 \pm r_3$	$\rho_1 = \rho'_1 \pm r_3$	
		$r_2 = r'_2 \pm r_3$		$\rho_2 = \rho'_2 \pm r_3$

注：利用①栏对应公式求过渡圆圆心坐标时，f 相当于 r_3，r_3 的符号判别与 f 相同。

5　单板与单片机控制器部分电路分析

当前电火花线切割数控系统正朝着多样化多层次方向发展，采用单板机、单片机等器件作为一类经济型线切割数控系统硬件平台，在国内使用很普遍。虽然此类系统存在着通用性差，不易进行功能扩展等缺陷，但由于造价低，还是适用于某些对控制性能要求不高，加工简单的工件环境。

国内早期使用 TP-801 单板机来搭建线切割控制系统，目前已基本上不再生产，但至今仍有不少线切割机还在使用同类的改进系统。Z-80CPU 与外设如电报机头输入、高频继电器、步进电机、变频采样电路等连接，一般使用 PIO 并行输入输出接口芯片，这里仅选取 PIO 并口芯片与外设连接几个典型电路进行分析，有关键盘输入和 LED 数码管显示电路和 RAM、ROM 存储器从略。

（1）单板机输出信号

1）步进电机功放接口电路，由 PIO 的 PA0 ~ PA2 、PA3 ~ PA5 输出，参见图 3.3-89。

当 X^{ao}（PAO）输出为高电平（3.5 V）时，合上进给开关（实际是 K_4 的 1 和 2 断开），与非门 YF1 的控制端 4 为高电平，X^{ao} 信号从与非门输出端 6 输出变为低电平（接近 0 V），此时使光电耦合器 117 输入二极管导通并发光，光线使 117 中的光敏三极管导通，3 kΩ 电阻下端处光耦输出为低电平（约为 0.1 ~ 0.3 V），使其控制的三极管 3DK7C 截止，其集电极处 X^a 为由 + 12 V 电源经历 330 Ω 电阻使发光二极管 BT202D（实际装在控制器面板上）发光，再经 330 Ω 电阻的高电平使功放板上的 DD01B 及 3DD15B 饱和导通。使 X^A 获得接近 0 V 的电位。此时步进电动机的 + 24 V 电源由 12 Ω 电阻限流，使 X 步进电动机 A 相绕组通过 2 A 电流（24 V/12 Ω = 2 A）。

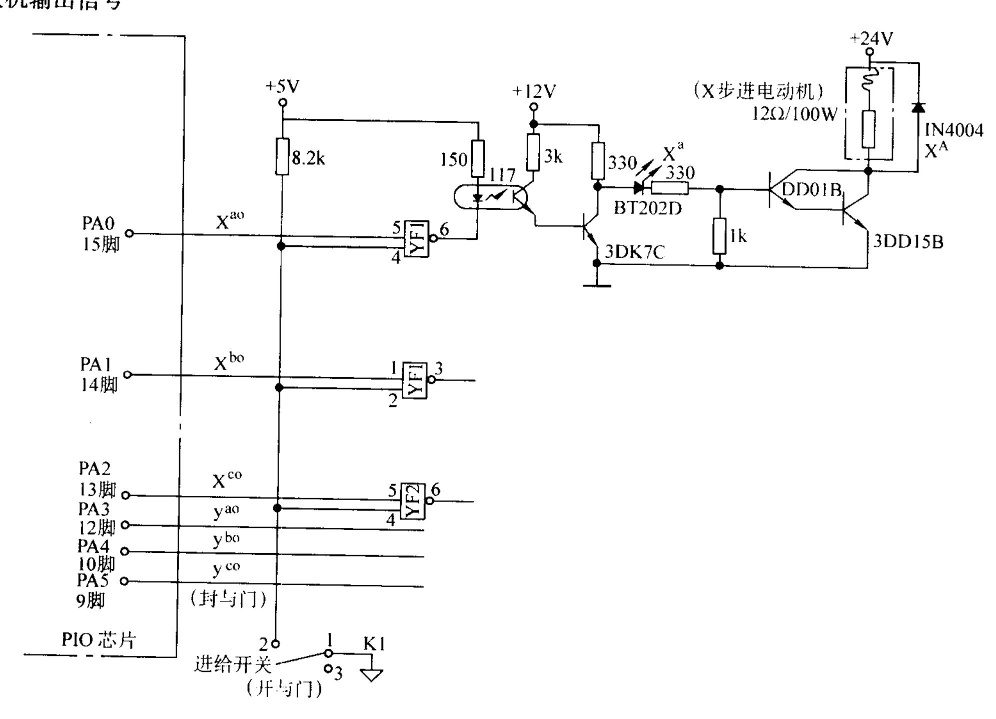


图 3.3-89　步进电机相位输入端



当 X^{a} 的输出变为低电平（近 0 V）时，YF1 的 6 脚输出为高电平，117 输入二极管不发光，117 中的光敏三极管截止，光耦输出处为高电平，使三极管 3DK7C 饱和导通，其集电极处 X^{a} 为低电平（0 V 左右），发光二极管 BT202D 不亮，功放板上的 DD01B 及 3DD15B 功放管截止。X^{A} 处为高电平，12 Ω 电阻中没有从 X 步进电动机 A 相绕组中流来的电流。

2）高频电源控制信号 PG，加工时需要对高频电源（产生电火花放电）接通和断开实现自动控制，它由 PA6 输出，参见图 3.3-90。

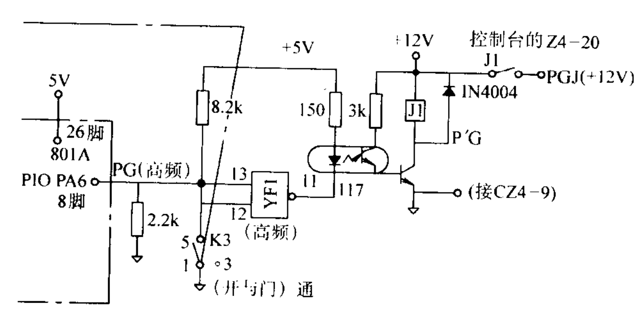


图 3.3-90　高频继电器 PG 信号

当有程序时，PG 为高电平，当合上面板上的高频开关 K3（实际是开关使 5 与接地（⏚）的 1 断开），与非门 YF1 的 12 脚为高电平，故其 11 脚输出为低电平（0 V 左右），使光耦 117 中的发光二极管导通并发光照射至 117 中的光敏三极管，使其饱和导通，把 + 12 V 经 3 kΩ 电阻加至三极管 3DK7C 的基极，使其饱和导通，把高频继电器 J1 的下端接地（0 V），使高频继电器 J1 吸合，这时其常开触头 J1 闭合，而输出 PGJ 为 + 12 V，去控制高频电源输出高频。

3）电报机输入头走纸信号 PJ 由 PB7 输出，产生脉冲信号，驱动电报机输入头的走纸线圈，参见图 3.3-91。

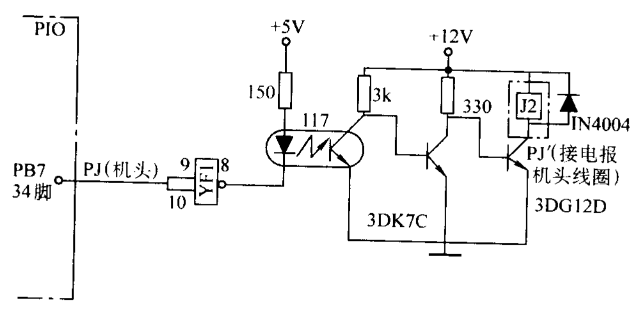


图 3.3-91　电报机头走纸信号

当电报机输入头工作时，PJ 走纸信号是一个在高电平和低电平间跳动变化的脉冲信号，每输出一个 PJ 正脉冲信号时，电报机输入头的电磁铁吸放一次，纸带往前走一行。

当 PJ 输出为高电平时（约 3.5 V），与非门 YF1 的 8 脚输出为低电平（约 0 V），使光耦 117 的发光二极管导通发光，射向 117 中光敏三极管的光线使光敏三极管导通，使 3DK7C 三极管的基极为低电平而截止，这是 + 12 V 经 330 Ω 电阻作用在三极管 3DG12D 的基极，而使其饱和导通，它的集电极处 P′J 为 0 V 左右，使电报机输入头线圈 J2 通电，而使电磁铁吸合，纸带走动一行。与线圈 J2 并联的二极管是续流二极管，它是吸收当线圈 J2 的电流通断时所产生的自感电势，以保护 3DG12D 三极管，因当线圈绕组在脉冲结束功率管截止时，产生继续流动的高压电势，如无此二极管提供续流通路，容易将功率管击穿而损坏，在高频控制及步进电机功放电路中都有此续流二极管。

（2）单板机的输入信号

1）当纸带从电报机输入头输入程序时，纸带信号 i1、i2、i3、i4、i5 分别由 PIO 的 PB0 ~ PB4 输入单板微机，见图 3.3-92。五单位纸带输入时，纸带上有五个稍大一点的孔，输入 i1、i2、i3、i4、i5 五个孔的信号，现用其 i1 信号的输入为例来分析。

当 i1 这位纸带上有孔时，使常闭触头 J21 闭合接地，使 i1 为低电平（约 0 V）；经 220 Ω 电阻使三极管 3DK7C 截止，光耦 117 也截止，输出为高电平，经 3 kΩ 电阻使 i1 信号为高电平，经 PB0 口输入微机。

当 i1 这位纸带上无孔时，纸带将常闭触头 J21 隔开，+ 12 V 经 3 kΩ 使 i1 处为高电平，经 220 Ω 电阻使三极管 3DK7C 导通，光耦 117 中发光二极管发光，光线使光敏三极管导通，光耦 117 右上角处输出为低电平经 3 kΩ 电阻和 PBO 口输入微机。

2）变频信号 P_b，当要求工作台进给时，PIO 的 $\overline{ASTB}$ 输入变频脉冲信号 P_b，参见图 3.3-93。

变频取样电路（见图 3.3-93 左上角处）。变频取样电路的作用是从工件和电极丝（电极丝处分别接线，取出工件和电极丝之间的间隙电压，经整流滤波和分压后输出一个 E 取样电压，供给变频电路，产生变频脉冲 P_b，当电极丝距工件的距离大时，取得的间隙电压高，即 E 取样电压高，所得变频脉冲的频率高，X、Y 工作台的进给速度快，当电极丝距工件的距离小时，取得的间隙电压低，E 取样电压也低，所得变频脉冲 P_b 的频率也低，X、Y 工作台进给速度慢，当正常切割工作时，经适当调节，可使进给速度恰好保证切割工作稳定正常进行。

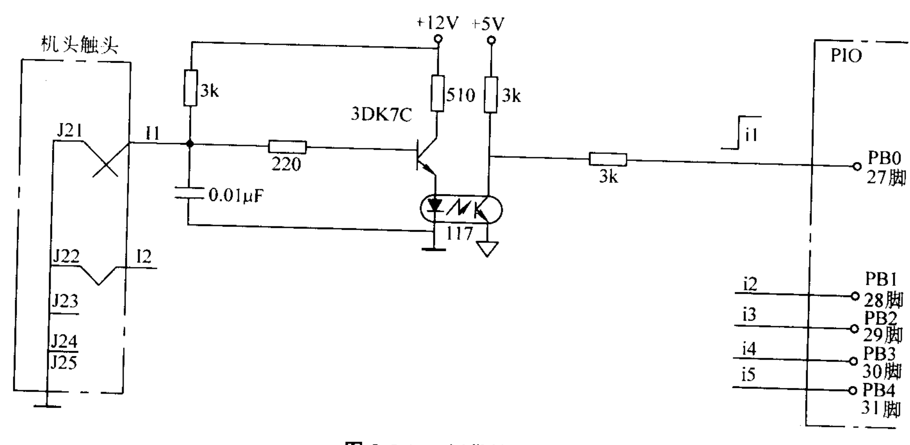


图 3.3-92　纸带输入信号



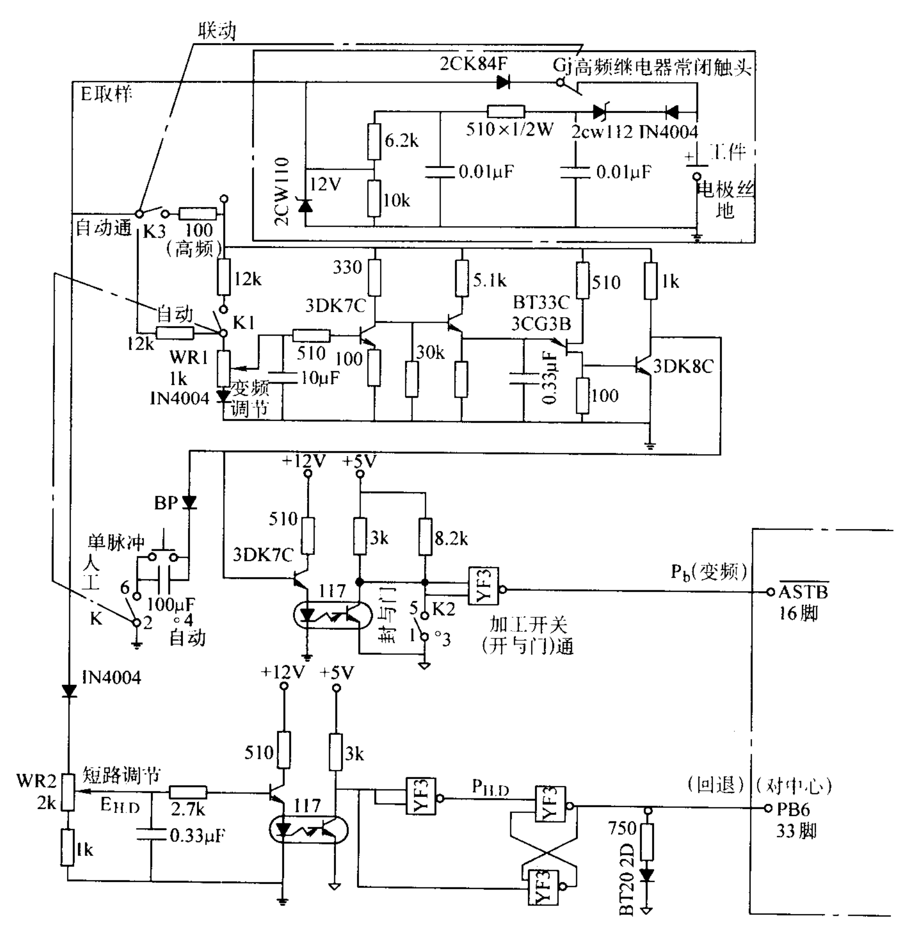


图 3.3-93　变频信号 P_b 及短路回退 $P_{H.D}$ 信号

加工时从工件和电极丝处所取出的间隙电压由于不断进行火花放电，其电压值是变化无常的，经 IN4004 二极管整流，又经两个 0.01 μF 的电容和 510 Ω 电阻所组成的滤波器滤波后，获得一直流电压，再经 6.2 kΩ 和 10 kΩ 电阻分压后获得 E 取样电压。当工件和电极丝开路（距离很大）时，空载取样信号电压过高，使 P_b 变频频率过高，会出现步进电动机跟不上而丢步现象，故对 E 取样电压应加以限制，所以在 E 取样处并联一个 12 V 稳压管 2CW110。变频取样电路的具体电路各厂家略有不同。

变频电路。变频电路把由变频取样电路获得的 E 取样电压，转换成变频脉冲 P_b，从接口电路 PIO 的$\overline{ASTB}$输入 TP－801A 单板微机。变频电路就是压－频转换电路。变频分为自动变频和人工变频，当变频电压来自 E 取样电压时为自动变频，当变频取样电压来自＋12 V 电源时为人工变频。

① 自动变频　当合上高频开关 K3 的 2、6 断开，2、4 合上，合上自动开关 K1 时，使 K1 的 1、5 断开，1、3 接上，这时 $E_{取样}$ 电压经 12 kΩ 电阻加在 1 kΩ 电位器 WR1 的上端，再经 1N4004 二极管接至地。再调变频电位器 WR1 的动触点取出一定的电压，此电压能随变频调节而变化，经 10 μF 电容滤除交流成分，经 510 Ω 电阻将变频取样电压作用于三极管 3DK7C 的基极，经直流放大，当取样电压升高时 3DK7C 三极管集电极输出电压降低，使 3CG3B 基极电压下降，使得其基极电流增加，其集电极电流也增加，此集电极电流是 0.33 μF 电容的充电电流，电流增加加速了该电容的充电速度，当电容充电电压值升高至单结晶体管 BT33C 的峰点电压 u_p 时，单结晶体管的 e 极对第一基极 b_1 极开始导通，随着发射极（e 极）电流的增大，e 极对 b_1 极之间变成低阻导通状态，因而电容 0.33 μF 中的电能通过 e 和 b_1 两极，迅速向 100 Ω 电阻放电，在 100 Ω 电阻上输出一个脉冲电压，由于 5.1 kΩ 电阻和 3CG3B 导通后等效电阻之和较大，当电容 0.33 μF 上的电压降到单结晶体管的谷点电压时，经 5.1 kΩ 等供给的电流小于谷点电流，不能满足其导通要求，于是 e 与 b_1 之间的电阻迅速增大，单结晶体管恢复阻断状况。此后电容 0.33 μF 又重新充电，重复上述过程，结果在电容 0.33 μF 上形成锯齿波电压，在电阻 100 Ω 上则形成脉冲电压。这就是单结晶体管自振荡电路的工作原理。改变电位器 WR1 的变频调节电压，就可以改变电容 0.33 μF 充电的快慢，即改变锯齿波的振荡频率。

在 100 Ω 电阻上形成的脉冲电压，经三极管 3DK8C 反相后在其集电极输出负脉冲，再经三极管 3DK7C 同相放大后，经光电耦合器 117 反相输出为正脉冲，当合上加工开关 K2 时，1 与 3 合上，1 与 5 断开，与非门 YF3 控制端 13 为高电平，由 12 脚输入的正脉冲反相由 11 脚输出负脉冲 P_b，此变频脉冲由$\overline{ASTB}$进入单板微机。调节变频脉冲 P_b 频率的高低，就能改变步进电动机进给速度的快慢。

② 人工变频　当高频电源的输出电压加在工件和电极丝上时，变频电压取自 E 取样电压，当关闭高频电源进行调机时需要工作台作变频进给，这叫做人工变频。这时自动－人工转换开关 K1 的 1 和 3 脱开，1 和 5 合上，使＋12 V 电源经 12 kΩ 电阻和 K1 的 5 和 1 与 WR1 可调电位器的上端接上，也就是用＋12 V 电源来代替自动变频时的 E 取样电压。其后面的电路及工作原理与自动变频时完全相同。

③ 变频电路的合理调节　加工时，希望进给速度对工件被电火花蚀除速度实现最佳跟踪，因此调好变频速度是很重要的。

变频进给快慢用变频调节电位器 WR1 来调整，变频一

般不应超过 200～400 步/s，调节范围应分布在 WR1 整个阻值范围内都能均匀地进行，若只能在较小的转动区域中进行，很难调到理想的进给速度，或者使变频电路出现阻塞停振现象。这是由于电路中 3CG3B 三极管的基极电流过大，使电容 0.33 μF 充电回路的等效电阻过小，流入单结晶体管 e 极的电流仍大于谷点电流，因而常维持单结晶体管导通，电容 0.33 μF 失去充放电的条件而造成停振，要想使三极管 3CG3B 所形成的等效电阻不致过小，可将 3DK7C 发射极 100 Ω 电阻的阻值适当增大，这样可以防止变频停振，又可以加宽电位器 WR1 的有效调节范围。

④ 单脉冲电路　在调机或维修时，需检查单步运算状态，要求发出单个变频脉冲 P_b。在人工变频状态下将变频调节电位器 WR1 输出至变频电路的电压调至最小，使变频电路没有脉冲输出，此时三极管 3DK8C 输出为高电平，使其后的三极管 3DK7C 导通，光耦 117 的光敏三极管也导通，与非门 YF3 的 12 脚输入为低电平，11 脚输出为高电平。当在人工变频状态时，K1 的 6 与 2 接上，当按下单脉冲按钮 AN 时，三极管 3DK8C 的输出端 BP 处经二极管 IN4004，按钮 AN 和 K1 的 6 与 2 接地，将 3DK7C 三极管的基极输入电压由高电平降到 0.7 V 左右，使 3DK7C 由导通变为截止，因此每按动一次单脉冲按钮 AN，变频电路 P_b 端输出一个负脉冲，进行一次插补运算，工作台进给一步。

3）短路回退信号 $P_{H.D}$　当工件电极丝间的加工间隙在加工过程中出现短路时，从 PIO 的 PB6 输入 $P_{H.D}$ 为高电平的短路信号。

在切割加工过程中，有时电极丝和工件之间会产生短路，发生短路时控制台面板上的短路灯亮，显示加工间隙电压的电压表指针指 0 V 左右，显示加工电流的电流值增大至短路电流值，由于此时变频取样的间隙电压为 0 V 左右，所以没有变频脉冲，工作台自动停止进给。有时短路在几秒钟内能自动消除，自动恢复正常加工，如短路后经一小段时间短路不能自动消除时，控制系统的短路回退功能开始起作用，使电极丝沿切割加工轨迹回退 256 μm（步），只有当 TP－801A 单板微机的 PB6 输入 $P_{H.D}$ 为高电平时，且经一段延时，短路现象仍未消除，控制系统才开始执行短路回退功能。

$P_{H.D}$ 的电平是受加工间隙电压控制的，当切割加工正常进行时，E 取样为靠近 12 V 的某电压值，该电压经 IN4004 二极管加在 2 kΩ 的短路调节电位器 WR2 上端，再经 1 kΩ 电阻接至地。调节 $E_{H.D}$ 的大小，使三极管 3DK7C 导通，光电耦合器 117 的输出至与非门 YF3 的 9 脚为低电平，经两个与非门二次反相 YF3 的 6 脚输出，使 $P_{H.D}$ 为低电平，短路回退功能不起作用，BT202D 短路灯也不会亮。

当加工间隙短路时，E 取样电压近 0 V，经电位器 WR2 的 $E_{H.D}$ 短路调节端电压也近 0 V，3DK7C 三极管截止，故光耦 117 输出为高电平，与非门 YF3 的 9 脚为高电平，经两次反相后与非门 YF3 的 6 脚输出使 $P_{H.D}$ 为高电平，短路信号灯 BT202D 发亮，如经一小段时间延时，短路现象仍未消除，控制系统控制步进电动机带动工作台开始回退。

4）自动找中心 $P_{H.D}$　自动对中心与短路回退共用同一个输入口 PB6，其信号仍用 $P_{H.D}$ 代号，当自动找中心时，电极丝与孔壁碰上时 $P_{H.D}$ 往 PB6 输入高电平电极丝离开工件时，$P_{H.D}$ 往 PB6 输入低电平，参见图 3.3-94。

自动找中心电路和短路回退电路的主要部分是同一个电路，其不同之处只是自动找中心电路的电位器 WR2 的电压信号不是由加工间隙转换而来的 E 取样电压，因自动找中心时高频电源是关闭的，没有高频电源的电压加在加工间隙上。自动找中心时的工作信号电压系来自＋12 V 电源，当关断高频开关 K3 时，K3 的 2 和 4 断开 2 和 6 接通，＋12 V

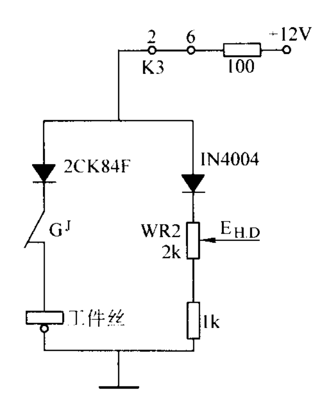


图 3.3-94　自动找中心电路

就加到短路调节电位器 WR2 的上端，同时高频继电器的常闭触头 GJ 是接通的，所以＋12 V 通过二极管 2CK84F 接到工件上。

当进行自动找中心时，电极丝与工件圆孔壁之间，存在着接触和不接触两种状态，即相当于加工间隙短路与不短路的情况一样。

当电极丝与工件接触时，＋12 V 经 100 Ω 电阻，高频开关 K3 的 6 与 2，在 2 点处分两路，一路经变频取样电路板上的二极管 2CK84F 和 PGJ 高频继电器的 GJ 常闭触点，接至工件并经电极丝至地。另一路由 K3 的 2 点往下经 1N4004、WR2 和 1 kΩ 电阻接至地，这是 K3 的 2 点处的电压值是 2CK84F 二极管的管压降，约为 0.7 V 左右（见图 3.3-94），此电压值经 1N4004 二极管后再加在 WR2 上端，相当于短路信号，故使 $P_{H.D}$ 获得高电平，即给 PB6 输入一个回退信号。

当电极丝回退离开工件时，＋12 V 经 1N4004 加在 WR2 上，相当于人工加工时的情况，$P_{H.D}$ 为低电平。

自动找中心的过程和原理为：设电极丝在孔内与工件不接触处的任一点，把电位器 WR2 旋至近地位置（即电阻值最小），以提高短路回退的灵敏度。当开始启动自动找中心时，电极丝自动向正 *X* 轴方向进给，直至与孔壁接触短路，控制系统令电极丝反向移动，并开始累计进给步数，直至沿负 *X* 轴方向进给了 *n* 步距离时，与负 *X* 方向的孔壁接触短路，控制系统令电极丝反向沿正 *X* 轴方向进给，进给步数为 *n*/2 步的距离时停止进给，此时，电极丝已位于孔的 *Y* 轴线上，接着电极丝改向正 *Y* 轴方向进给，直至与孔壁短路而自动沿负 *Y* 轴方向进给，并开始累计行程距离，直到与孔壁接触短路，若与孔壁接触停止进给时的累计步数为 *m*，此时，电极丝自动反向沿 *Y* 轴方向运动到 *m*/2 步时自动停止，而处于圆孔中心处。

（3）线切割控制器场效应管功放电路及变频电路

用场效应管作功放管，因为它是电压驱动，对前级的电流要求不大，故可以把电路设计得非常简捷，下面是一种实际应用的电路。

1）步进电动机驱动电路　图 3.3-95 所示为用 IRF640 场

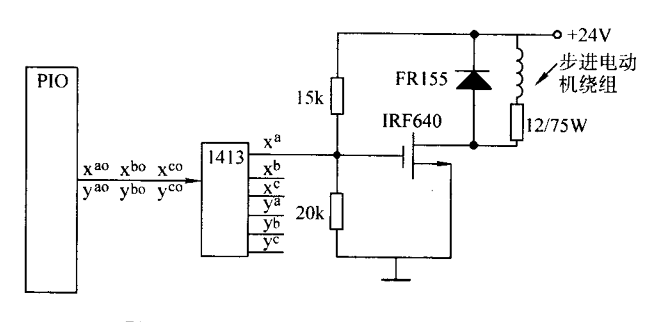


图 3.3-95　场效应功放管步进电动机驱动电路



效应管作功放管驱动步进电动机，由单板微机发出的进给控制信号，由 PIO 发出 X^{ao}、X^{bo}、X^{co}、Y^{ao}、Y^{bo}、Y^{co} 经达林顿驱动电路 1413 直接驱动场效应管的栅极，1413 起一定的放大和隔离作用。此电路在实际应用中效果很好。

2）变频取样及双基极管变频电路　图 3.3-96 所示的变频取样电路，在整流二极管 D 之前由工件接出的取样信号先需经过两个 18 V 的稳压管 1N4745，它们起限幅作用，短路脉冲电压和间隙火花电压均因有此限幅而不会产生变频进给，使变频取样稳定，尤其是接近短路时不会有进给。两个 470 Ω 电阻间的 36 V 稳压管，也是起限幅作用，当正常加工时它不起作用，在间隙开路时它限制 E 取样电压不能太高，以保护后面的电路。E 取样电压分压后经光电耦合器 G0102 把变频信号传给由双基极管（单结晶体管）为主的变频电路，由 9 点输出变频脉冲至单板微机。

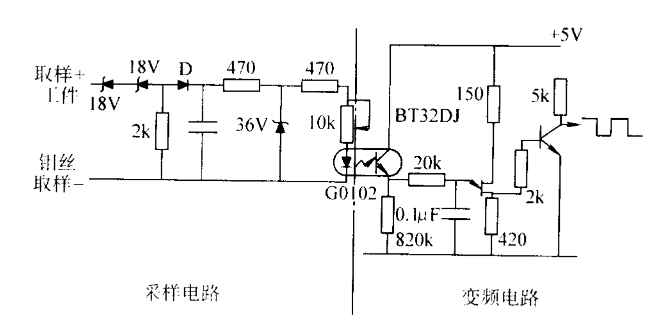


图 3.3-96　稳压管取样及双基极管变频电路

3）用 331 压频转换器的变频电路　图 3.3-97 所示是一种用 331 作压频转换的变频电路，当接 E 取样电压或人工接 + 12 V 时，331 芯片的第 3 脚输出脉冲信号，调节 2.2 kΩ 变频调节电位器时，EB 电压高输出脉冲频率高，反之 331 的 3 脚输出脉冲频率低。脉冲经 9014 三极管 T1、T2、T3 和光耦 117 后所得的变频脉冲，再输入到微机中，用它控制微机发出控制步进电动机进给信号的脉冲频率。

目前各生产厂家所采用的控制电路形式各异，随着电子技术的发展，它也不断改进或更新。

在此类控制系统中也有使用 8051 单片机，8255 并口芯片以及 EPLD 大规模可编程逻辑电路大大扩展了输入输出功能和引脚，但就其与外设连接，基本上是相通的。

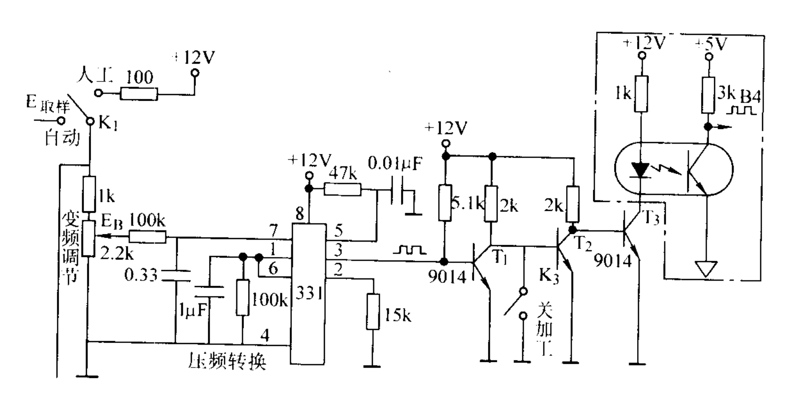


图 3.3-97　331 变频电路

6　基于 PC 机大线切割控制与接口技术

采用 PC 机作为线切割加工控制系统，其功能已远远超于单片单板机，其特点是可以充分利用系统机丰富的硬、软件资源，能够集自动编程与加工控制为一体。

按其结构分有两种类型，一种类型是加工插补运算、控制及自动编程系统均由 PC 机的 CPU 执行，通过 PC 机内 ISA 总线连接并行接口芯片，控制外设的各种输入输出信号、通过放大，达到线切割加工目的。不足之处，自动编程和加工控制较难同时进行。

另一种类型为双 CPU 工作方式，用下位机（单片机）作插补运算并与外设各种接口连接，进行 I/O 输入输出传送。如输出各个步进电机的相位量；输出有关的开关量；输入电源变频采样的信号等等，而 PC 机则担任自动编程、图形显示和加工时对图形实时监控；各种在加工过程中所需要的开关量和电源参数调整，及进给速度调整都通过 ISA 总线槽口或 RS232 串口与下位机（单片机）进行实时通讯，单板机接受命令后作出相应动作。这种双 CPU 形式可同时进行自动编程和加工控制互不影响，有效提高了 PC 机控制的能力。

6.1　PC 机编程与控制

大型绘图软件如 AutoCAD 等功能性很强，适应范围很宽，很多复杂的图形绘图和处理都能实现，由于线切割所加工的仅仅是一些二维的图形、三维直纹面图形，图形简单，所用到的绘图工具和方法仅是大型绘图软件包中一小部分，如点、线、圆画法及相切处理，配以对称、旋转、复制、删除、恢复等图形工具，足以应付线切割作图编程的需要，无需很大的软件包支持。在自动切割编程中，线切割加工有它的特殊一面，在扩展切割加工功能和范围有必要进行与上述情况相对应的软件开发。这里以 "YH 型" 线切割控制与编程系统为例来作简要的介绍。

（1）加工控制界面

图 3.3-98 为 TP 控制屏幕，仅是诸多控制屏幕一种。一般而言系统所有的操作按钮、状态、图形显示全部在屏幕上实现。各种操作命令均可用鼠标或相应的热键完成。鼠标器操作时，可移动鼠标器，使屏幕上显示的箭状光标指向选定的屏幕按钮或位置，然后按一下鼠标器左边的按钮。下面说明中凡用光标点取均指上述鼠标器操作。屏幕中列出各控制功能。

1）图形的显示和实时监控　当 PC 机通过自动编程或读入加工指令代码，如 ISO，3B，4B 等指令，在显示窗口中立即显示出对应于这些指令的图形，通过左右、上下、移动、命令或放大（缩小）命令操作可对图形作相应调整处理。同样可通过旋转，对称平移来改变图形的位置，适应加工时装夹工件位置的需要。它既可以显示图形也通过界面的切换进入到文本编辑框，对指令代码修改来改变图形的形状和位置。在文本框内直接编写指令代码，如 ISO，3B 等代码，可立即得到相对应的图形。如点击 "YH" 进入文本编辑，输入 ISO 代码或 3B 等代码。

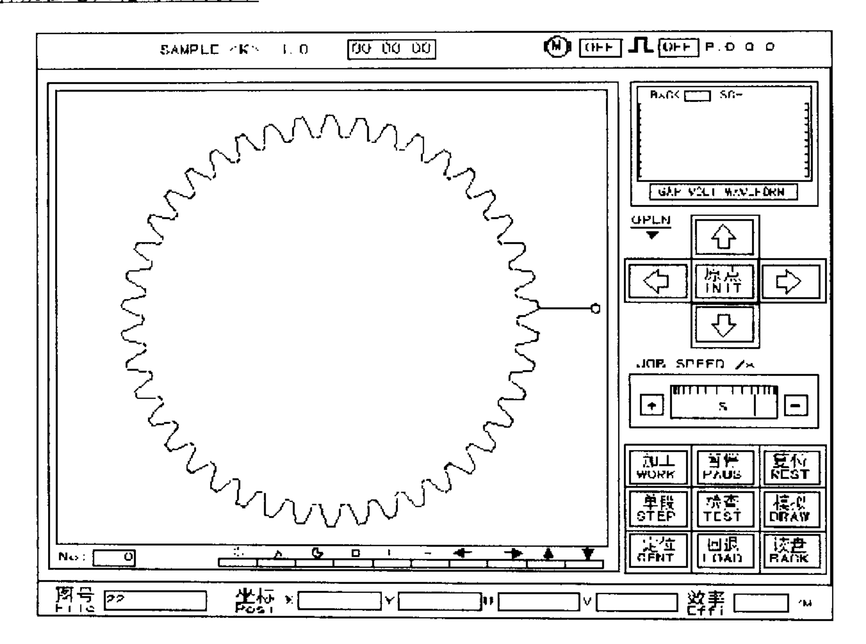


图 3.3-98　自动编程系统的工作界面

在实际加工中，单板机接受 PC 指令实施插补运算时，实时将 x、y、u、v 即时状态，到各步进电机相位端，获得增量。同时通过 ISA 总线将 x、y、u、v 位置量回送给 PC 机，PC 机按照所获得增量，在图形相对应的位置打上另一种色点，这样在显示屏图形上有二种颜色线，如图形轨迹线为棕红色，实时轨迹线为黄色，可从图形二色线重叠情况来观察加工的轨迹是否有偏差，用这种实时性的图形监控方式，直观有效，改变了原来停机观察在工件上的切割轨迹这种原始方法。当单板机由于某种原因，如干扰，图形实时监控轨迹会偏离原图形轨迹，这意味着加工出错。PC 机需对实时的加工位置，在一定误差范围内作相应的检验，判定当前位置正确性，如有出错，则出错告示，作相应处理，减少不必要的损失。当然这种轨迹检验、算法必须合理，PC 机必须稳定可靠，否则会得不偿失。

由于引进了锥度和上下异形加工，显示采用二维、三维方法。一般情况下，屏幕显示加工轨迹都是上下导轮的运动轨迹，但是上下异形工件时上下线架轨迹与工件上下端面轨迹相差甚远，因此利用三维造型处理，既可显示上下线架轨迹，也可显示工件上下二端面的图形轨迹，可准确地描绘出工件任意截面的轮廓轨迹。

如图 3.3-99，正确设置三维参数窗线架高度，基面高度，工件厚度和 x，y，z 轴夹角，点击图 3.3-100 三维立体轨迹命令条，在屏幕上显示图 3.3-103 三维立体轨迹，点击线架两端命令条，在屏幕上显示图 3.3-101 线架两端轨迹。

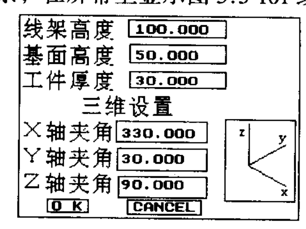


图 3.3-99　三维设置参数窗

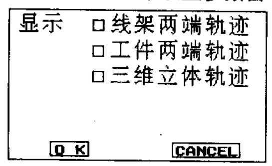


图 3.3-100　三维显示状态

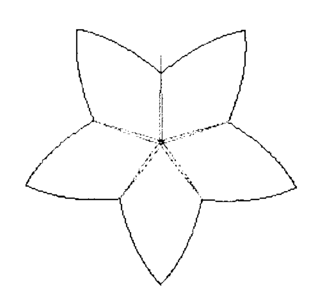


图 3.3-101　线架两端轨迹

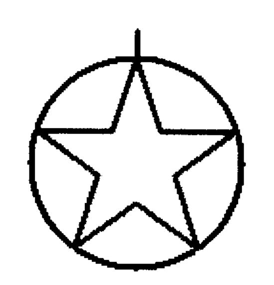


图 3.3-102　工件两端轨迹

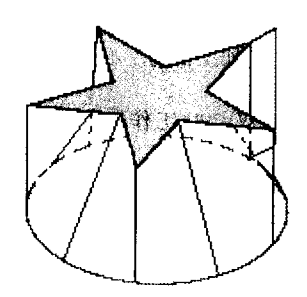


图 3.3-103　三维立体轨迹

同样点击工件二端轨迹命令条，显示图 3.3-102 工件两端轨迹。改变基面高度和工件厚度距离，就可显示在二线架间的任意高度的位置。

除图形显示功能外，它还能显示当前加工的指令码段号，以及实时的 x、y、u、v 绝对坐标和相对坐标，便于查对当前段轨迹坐标位置，这样既可以用实时图形轨迹，又可以用坐标数据校对检验加工位置。



2）基本功能键作用　可用鼠标点击热键获得各功能的实现，PC控制一般都有这些控制功能。

① 加工　用光标点取该按钮（或按‘W’键）进入加工方式（自动）。首先自动打开电机和高频，然后进行插补加工。

② 暂停　用光标点取该按钮（或按‘P’键或数字小键盘区的‘Del’键），系统将中止当前的功能（如加工、单段、控制、定位、回退）。

③ 复位　用光标点取该按钮（或按‘R’键），将中止当前的一切工作，清除数据，开闭高频和电机（注：加工状态下，复位功能无效）。

④ 单段　用光标点取该按钮（或按‘S’键），系统自动打开电机、高频，进入插补工作状态，加工至当前代码段结束时，自动停止运行，关闭高频。

⑤ 单步　用光标点取该按钮（或按‘T’键），系统以插补方式运行一步，可检查x，y，u，v读数，验证插补运算正确性。若电机处于ON状态，机床拖板将作相应的一步动作。

⑥ 模拟　用光标点取该按钮（或按‘D’键），系统以插补方式运行，显示窗口绘出其运行轨迹。若电机为ON状态，机床拖板将随之运动。

⑦ 定位　用光标点取该按键（或按‘C’键），系统可作自动对中心，或者定x左右端面，y上下端面方向的操作（定中与定端面，即±x±y中心，5个操作项预先在规定菜单内作相应设定）。

⑧ 回退　用光标点取该按钮（或按‘B’键），系统作回退运行，至当前段走完时停止；若再按该键，继续前一段的回退。此功能不自动开启电机和高频，可根据需要事先设置。

⑨ 电机开关状态　在电机标志右边有状态指示标志ON（红色）或OFF（黄色）。ON状态，表示电机上电锁定（进给）；OFF状态为电机释放。用光标点取该标志可改变电机状态（或用数字小键盘区的“Home”键）。

⑩ 高频开关状态　在脉冲波形图符右侧有高频电压指示标志。ON（红色）表示高频开启，OFF（黄色）表示高频开闭。用光标点取该标志可改变高频状态（或用数字小键盘区的Pgup键）。在高频开启状态下，间隙电压指示显示间隙电压波形。

⑪ 拖板点动按钮　屏幕右中部有上下左右向四个箭标按钮可用来控制机床点动运行。每次点动时，机床的运行步数可以预先设定。在电机为ON的状态下，点取以上四个按钮，可控制机床拖板的点动运行；上下左右四个方向分别代表+y/+v、-y/-v、-x/-u、+x/+u、x-y或u-v轴系的选取可以设定（“参数设定”节）。

⑫ 原点　用光标点取该按钮（或按‘I’键）进入回原点功能。若电机为ON状态，系统将控制丝架回到最近的加工起点（包括u-v坐标），返回时取最短路径。若电机为OFF状态，光标返回坐标系原点，图形重叠。

（2）系统主要控制功能

1）增加输入接口功能

① 由于PC机带自动编程，是编控一体的线切割机床，为了拓展输入范围，特别强调它既能输入图形文件，如DXF，IGES等文件用于对图形的切割编程，同时对3B，4B，ISO等加工指令也可直接输入进行加工，或转换成相应的图形，对它作相应的切割编程，来达到间隙补偿、斜度、上下异形，多次切割等加工功能，也可以接受其他包含间隙斜度相关加工指令的ISO，3B等代码进行锥度加工，故而PC机输入接口应能容纳带不同后缀名的图形文件、加工指令代码，来扩充加工范畴。应考虑同国外的慢丝线切割机床接轨。

② 用RS232串口形式，对其他线切割机床或PC机进行文件传送，它可以多机实行从机并行通讯。

2）脉冲电源参数设置　以往脉冲电源参数如脉宽间隔、功放管个数设置都是直接在脉冲电源装置中，用人工设置，而今某些PC机中这些参数都可在PC机中用热键设置，然后通过PC上位机，把这些电源参数经PC总线输入到下位机，再由下位机输送到脉冲电源装置中，来改变脉冲电源参数值以适应各种加工状态。这种对电源参数控制条件是：首先对高频电源各参数数字化处理，一种方法是采纳廉价的89C2051CPU，用软件形式设置各档脉冲宽度可从2 μs～100 μs可调，间隔也很容易用软件设定，至于功放管个数可用脉冲电源CPU及可编程逻辑芯片GAL控制多个功放管。由于89C2051具有串口通讯口，因而下位机可方便与之实行参数设置，这就提供PC机自动控制电源参数设置功能。我们可在加工的G指令中插入改变高频电源参数指令如Pa，b，c（其中a为脉宽，b为管数，c为间隔），一旦PC机将这指令传到下位机，就可瞬间改变电源参数设置。这对设计多次切割加工专家系统，及电源参数直接用P指令写在加工G指令间，达到自动改变电源参数功能而无需进行人工干预。人工设置如点击高频电源参数设置菜单，弹出设置框，其内容如下：

① MODE（模式）0～9挡；

② ENEGER SET 功放管数0～9　10挡；

③ PuLSE CuRR（间隔）0～9　10挡；

在框中填入相应参数即可设置。设置完毕关闭该框，系统即将各参数传送到下位机，通过串口对高频电源设置，也可以直接用热键，如M，N键递增或递减功放管数，“[”、“]”键递增递减间隔数等。

3）短路回退参数设置　线切割加工，跟踪调节不好或者冷却液冲洗不良等其他因素，使短路现象常有发生。采用短路自动回退方法，调整合理时，对稳定持续加工带来很大方便，不再需要人工来处理短路。

在有些采用PC控制电火花线切割机的系统中，高频电源取样信号是通过模数转换，用V-f变频，进给较为合理，它可以随时取出这些在电极丝工件间的间隙电压转换成数字量，由PC机分析获取短路自动回退的合理的时刻，防止过深短路或避免假象短路。回退依据参数设置如下。

① CTRL TIME（单位秒）　设定检测的单位时间，在设定的单位时间内对短路状态进行检测，用于控制短路自动回退。

② SHORT CuT SET V　短路设定值，这是工件与电极丝短路时，其采样电路的电平幅值，单位是空载高频电源满幅值的百分比。高频打开，电极丝未与工件接触时，在显示屏间隙电压指示器上的间隙电压波形近满幅（10小格）。据此可设定短路幅值一般为18%～22%，可观察高频换向切割时，这条红色带子所处于水平高度的位置，一般可认作短路的平均电压幅值百分比。

③ BACK ENABLE V　在设定检测时间内（CTRL TIME）系统每次采样检测的间隙电压值，低于短路设定值（SHORT CuT SET V）的比率大于等于BACK ENABLE V的设定值，系统作自动回退。从上分析易知要正确实行自动回退，必须对上述三参数作合理设定，一般而言检测单位时间是根据电极丝排绕在丝筒上的宽度设定一般约7～9 s。至于短路百分值和短路脉冲数和百分值，一般要根据工件厚度及加工状态设定。这种短路自动回退的设置，给PC机实行自适应控制创造了有利条件。

用PC机对高频电源参数和短路自动回退依据的设置，对自动控制高频电源参数，自动调节加工速度和减少断丝稳定加工提供了很大的方便，有理由相信将会涌现这种用PC

机控制的自适应高频脉冲电源。

4）上下异形加工　线切割特殊加工有很多种，如使用回转盘切割，上下异形工件加工，直纹面工件螺线加工等，充分利用已有硬件设施，如大十字滑板（看成电极丝作平动）、小十字滑板带动上线架作极丝倾斜运动可切割出上下异形工件来，一般这要先对上下二图形进行切割编程，然后进入自动切割编程产生出四轴联动的 G 指令，直接输入 PC 机中，就可以利用现成的“平动”、“倾斜”来加工上下异形工件。需要说明的是四轴联动功能的 PC 机控制线切割机一般都能进行上下异形加工，但必须先对上下异形工件进行自动编程。具有上下异形加工的机床，可以方便地通过 PC 机切割编程来处理顶底等半径加工及变斜度切割加工，这些功能在模具加工中使用较多。特别是镶拼件加工，如拼缝处不带斜度，型腔带斜度等。

5）其他辅助功能

① 过切处理　很多加工零件，需要起割点的接缝凹凸点越小越好，应对起割点进行过切处理。图 3.3-104 所示为顺时针加工，*A* 点为图形起割点，在 *B* 点设定暂停点，切割到 *B* 暂停，再从 *B* 点增设一条指令加工到 *C* 点，切除 *A* 点的凸痕。通常可采用两种方法进行处理：一种是 *AB* 长度可根据最后的一条指令百分比设定（当此值为 0，不予暂停）；另一种是设定过切值，*C* 点用 *AC* 长度来消去切入点 *A* 处凸痕。

② 倾角处理　在还没有采用倾角处理系统（包括自动调整拐角处电源能量和进给）时，一般 PC 机采用软件处理如图 3.3-105，在切割编程中予以定义，其线长及圆半径可由操作人输入，或系统内部根据拐角的角度等来设定。

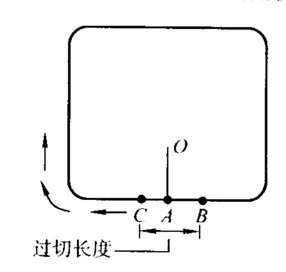


图 3.3-104　过切处理

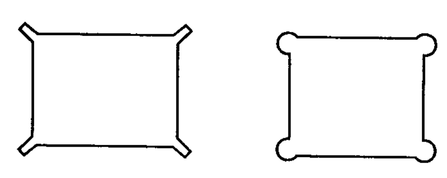


图 3.3-105　倾角处理

6.2　串行通信

线切割加工控制越来越多地依赖于 PC 机，因而在 PC 机与 PC 机之间通信，PC 机和下位机（单片机）通信，PC 机与线切割外设，如高频电源通信等已广泛地得到应用。采用串口通讯方法即可简单地实现相互之间的信息传送。

（1）串行通信的基本概念

1）串行通信的特点　在串行通信中，由于信息在一个方向上传输，只占用一根通信线，因此这根线既作数据线又作联络线，也就是说要在一根传输线上既传送数据信息，又传送联络控制信息，这就是串行通信的最主要的特点。为了能识别在一根线上串行传送的信息流中，哪一部分是联络信号，哪一部分是数据信号，就引出了串行通信的一系列约定。因此，串行通信的第二个特点是它的信息格式有固定的要求（这一点与并行传送不同），分异步和同步信息格式，与此相应，就有异步通信和同步通信两种方式。第三个特点是串行通信中对信息的逻辑定义与 TTL 不兼容，因此，需要进行逻辑电平转换。

2）数据传送的方向　串行通信中，数据通常是在两个站（如终端和微机）之间进行传送，按照数据流的方向可分成三种基本的传送模式，这就是全双工、半双工和单工。但单工目前已很少采用，下面仅介绍前两种模式。

① 全双工（Full Duplex）　当数据的发送和接收分流，分别由两根不同的传输线传送时，通信双方都能在同一时刻进行发送和接收操作，这样的传送方式就是全双工制，如图 3.3-106a 所示。在全双工方式下，通信系统的每一端都设置了发送器和接收器，因此，能控制数据同时在两个方向上传送。全双工方式无需进行方向的切换，因此，没有切换操作所产生的时间延迟（一般为毫秒级）。

② 半双工（Half Duplex）　当使用同一根传输线既作输入又作输出时，虽然数据可以在两个方向上传送，但通信双方不能同时收发数据，这样的传送方式就是半双工制，如图 3.3-106b 所示。采用半双工时，通信系统每一端的发送器和接收器，通过收/发开关接到通信线上，进行方向的切换，因此，会产生时间延迟。收/发开关实际上是由软件控制的电子开关。

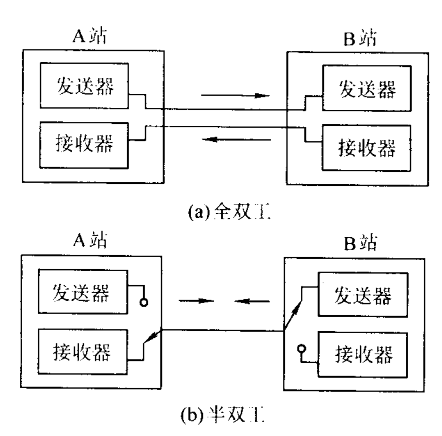


图 3.3-106　传送模式

目前多数终端和串行接口都为半双工模式提供了换向能力，也为全双工模式提供了两条独立的引脚。在实际使用时，一般并不需要通信双方同时既发送又接收，像打印机这类的单向传送设备，半双工就能胜任，也无需倒向。

3）传输速率与传送距离　并行通信中，传输速率是以每秒传送多少字节（B/s）来表示。而串行通信中，在基波传输情况下是用每秒钟传送的位数（bit/s）即波特率来表示。

最常用的标准波特率有 110、300、1 000、1 200、2 400、4 800 和 9 600 和 19 200 bit/s 几种。串口间通常直接以电缆连接，最大距离 15 m，通信速率低于 20 kbit/s。

（2）串行通信协议

所谓通信协议是指通信双方的一种约定。约定中包括对数据格式、同步方式、传送速度、传送步骤、检纠错方式以及控制字符定义等问题作出统一规定，通信双方必须共同遵守。因此，也叫做通信控制规程，或称传输控制规程。

目前，采用的通信协议有两类：异步协议和同步协议。同步协议又有面向字符（character - oriented）和面向比特（bit - oriented）以及面向字节计数等三种。

（3）串行接口标准

在串行连接时要解决两个问题，一是计算机和外设之间双方要共同遵循的某种约定，这种约定称为物理接口标准，包括连接电缆的机械、电气特性、信号功能及传送过程的定



义，它属于ISO’SOSI七层参考模型中的物理层。二是按接口标准设置计算机与外设之间进行串行通信的接口电路。

1）联络控制信号线的9针线定义

① 数据装置准备好（Data Set Ready，DSR）　有效时（ON状态），表明MODEM处于可以使用的状态。

② 数据终端准备好（Data Terminal Ready，DTR）　有效时（ON状态），表明数据终端可以使用。

这两个信号有时连到电源上，一上电就立即有效。目前有些RS-232C接口甚至省去了用以指示设备是否准备好进行发送或接收数据的这类信号，认为设备始终都是准备好的。可见这两个设备状态信号有效，只表示设备本身可用，并不说明通信链路可以开始进行通信了。能否开始进行通信要由下面的控制信号决定。

③ 请求发送（Request To Send，RTS）　用来表示DTE请求DCE发送数据，即当终端要发送数据时，使该信号有效（ON状态），向MODEM请求发送。它用来控制MODEM是否要进入发送状态。

④ 允许发送（Clear To Send，CTS）　用来表示DCE准备好接收DTE发来的数据，是对请求发送信号RTS的响应信号。当MODEM已准备好接收终端传来的数据，并向其发送时，使该信号有效，通知终端开始沿发送数据线TXD发送数据。

这对RTS/CTS请求应答联络信号是用于半双工MODEM系统中作发送方式和接收方式之间的切换。在全双工系统中因配置双向通道，故不需RTS/CTS联络信号，使其变高电平。

⑤ 接收线信号检出（Received Line Signal Detection，RLSD）　用来表示DCE已接通通信链路，告知DTE准备接收数据。当本地的MODEM收到由通信链路另一端（远地）的MODEM送来的载波信号时，使RLSD信号有效，通知终端准备接收，并且由MODEM将接收下来的载波信号解调成数字量数据后，沿接收数据经RXD送到终端，此线也叫数据载波检出（Data Carrier Detection，DCD）线。

⑥ 振铃指示（Ringing Instractor，RI）　当MODEM收到交换台送来的振铃呼叫信号时，使该信号有效（ON状态），通知终端，已被呼叫。

⑦ 发送数据（Transmitted Data，TXD）　通过TXD线终端将串行数据发送到MODEM（DTE→DCE）。

⑧ 接收数据（Received Data，RXD）　通过RXD线终端接收从MODEM发来的串行数据（DEC→DTE）。

⑨ 地线　有两根地线SG、PG——信号地和保护地信号线，无方向。

上述控制信号线何时有效、何时无效的顺序表示了接口信号的传送过程。例如，只有当DSR和DTR都处于有效（ON）状态时，才能在DTE和DEC之间进行传送操作。若DTE要发送数据，则预先将RTS线置成有效（ON）状态，等CTS线上收到有效（ON）状态的回答后，才能在TXD线上的发送串行数据。这种顺序的规定对半双工的通信线路特别有用，因为半双工的通信线路进行双向传送时，有一个换向问题，只有当收到DEC的CTS线为有效（ON）状态后，才能确定DCE已由接收方向改为发送发向了，这时线路才能开始发送。

2）信号线的连接　近距离通信时，不采用调制解调器MODEM（称零MODEM方式），通信双方可以直接连接，这种情况下，只需使用少数几根信号线。

最简单的情况，在通信中根本不要RS-232C的控制联络信号，只需使用3根线（发送线、接收线、信号地线）便可实现全双工异步串行通信，如图3.3-107所示。图中的2号线与3号线交叉连接是因为在直连方式时，把通信双方都当作数据终端设备看待，双方都可发也可收。在这种方式下，通信双方的任何一方，只要请求发送RTS有效和数据终端准备好DTR有效就能开始发送和接收。

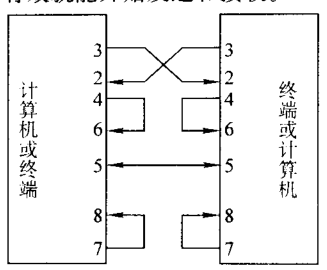


图3.3-107　最简单的通讯方式

图3.3-108连接方法简单但具有良好的硬件握手功能。

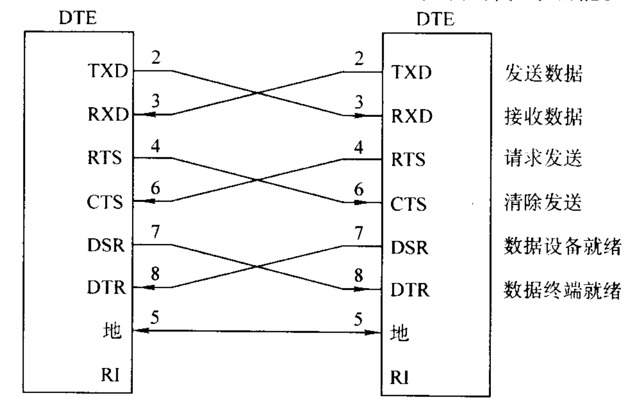


图3.3-108　RS-232C联络控制信号

RS-232C标准规定，若不使用MODEM，则在码元畸变小于4%的前提下给出。为了保证码元畸变小于4%的要求，接口标准在电气特性中规定，驱动器的负载电容应小于2 500 pF。

（4）应用实例

下面介绍一个应用半双工传送模式的通信软件。

该软件采用了半双工的传送模式，即收发数据在一根传输线上完成，PC机之间的连接只需一根传输线及一根地线，这样可以提高传输的质量，减少传输途中的信号干扰，增加传输距离，提高传输速率。

要实现上述传输模式，需在端口处添加若干硬件，以适应单线收发的传输模式。(见图3.3-109)。

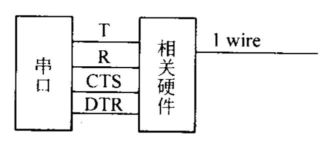


图3.3-109　半双工传送模式

在软件中以软件控制DTR的状态作为控制收发的电子开关，置1时为发送，0时为接收。一般情况下DTR始终为0，只有在发送时将DTR置为1，发送完毕即恢复0状态。

单线传输的另一优点就是方便实现多机之间的相互通信。多台PC间均以单一电缆连接，任意两台PC间都可实现收发通讯。PC间的连接见图3.3-110。

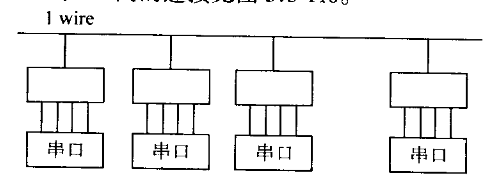


图3.3-110　多台PC间通信

软件的收发流程如图 3.3-111。

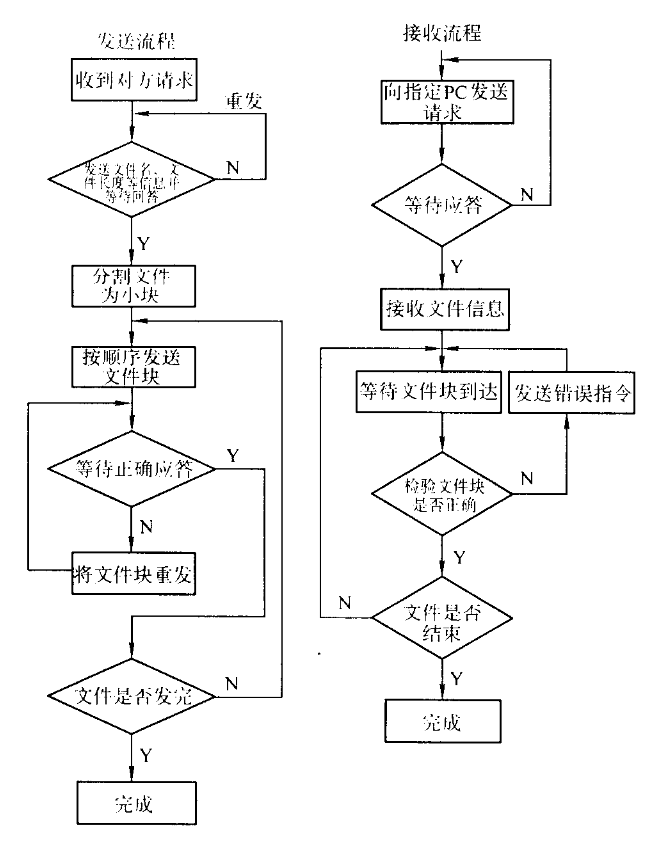


图 3.3-111 软件收发流程

由于线路的原因，在文件传输过程中往往会产生错码而导致发送接收无法正常进行。虽然在产生错误后重新发送文件块可以解决一部分问题，但当线路完全阻塞时，收发必然中断。如果文件较大，则重新发送需较多时间，所以软件还需提供续传的功能，即在刚才的断点处继续发送/接收文件。欲实现这一功能，需在原先传输文件块时将每一块都附上编号，并在产生错误时，由接收方及时记录下已传送的文件块号，而发送方则不需记录。在续传时，先由接收方提供上次传输的文件名及中断文件块号，则发送方即可由断点处继续发送，从而实现续传功能。

附一：串口通讯工作界面（见图 3.3-112）

附二：关于配置文件（comsetr.ini）的设置

该通讯软件由配置文件决定一些必要的参数（如串口号，波特率等），为使通讯正常进行，每台 PC 机都必须正确完成对配置文件的设置。

第一行：设置本机所使用的串口号（1 即 Com1，2 即 Com2...）；

第二行：设置波特率：共分六挡。
由低到高排列：4800；9600；19200；38400；57600；115200（默认）；

第三行：设置本机编号（1 即 1 号机，...）；

第四行：设置接收文件存储目录，从它机接收的文件存放于此目录中；
（要求输入完整的目录路径）

第五行：设置可供它机访问的目录，它机可从此目录中选取所需文件。

Example:

Comsetr.ini

2 串口

57 600 波特率为 57 600 bit/s

1 本机号码为 1

c: \ com

c: \ data

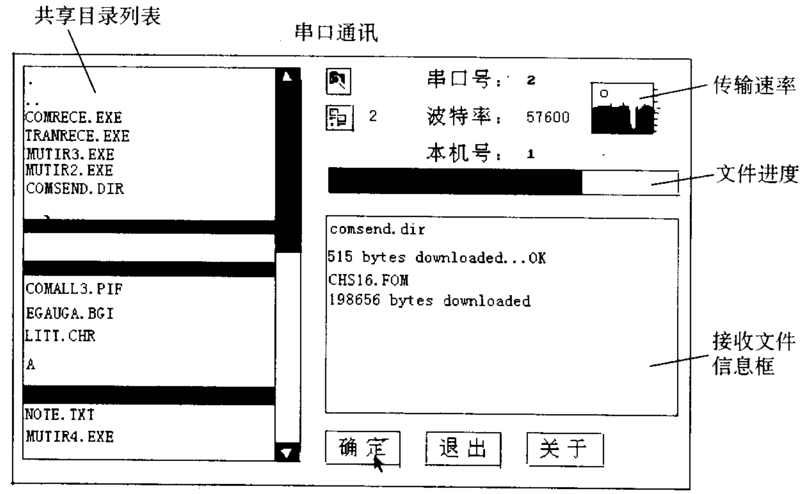


图 3.3-112 串口通讯工作界面

6.3 PC 机接口技术

（1）PC 机总线信号

在所有计算机系统中（包括通用型和嵌入式计算机）都需要一个系统总线。系统总线其实就是各种信号的一个总称，其中包括数据总线、控制总线以及其他计算机系统中的重要信号。在通用的计算机系统如 PC 中，系统总线非常重要，因为它使用户可以根据自己的具体需要对计算机的功能进行配置，既可以把不需要的功能取消，也可以根据需要添加新的功能。通过系统总线，用户可以增加内存的容量，还可以添加新的硬件设备，甚至完全改变系统的设置。例如，从计算机系统中取下不再需要的硬件设备是非常普通的事，当然也可以增加需要的端口和设备到系统中，还可以把通用的计算机系统改装成嵌入式的计算机系统。

PC 电脑的主板上有很多类型的系统总线，最通用的系统总线包括 ISA、EISA 和 PCI 几种。在有的计算机上还设置了不止一种系统总线，有的系统中 ISA、EISA 和 PCI 系统总线都组合在一块主板上。这里仅介绍一种常用系统总线，也就是 ISA 总线的先驱。

主板上一个 62 针插卡即为系统总线，这些插槽可以通



过插件连接器来连接一些功能电路板。在该插槽中共有62个信号，其中包括数据总线、地址总线、控制总线和总线的供电电源。所有这些信号的电平都是与TTL兼容的，而且都是由微处理器或其他系统组件（如中断控制器、DMA控制器等等）来进行控制的。这些信号及其功能见图3.3-113。

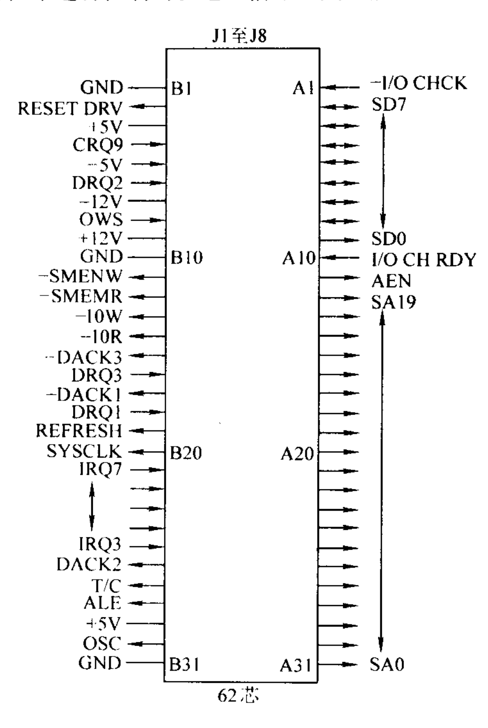


图3.3-113 I/O通道插座的插脚分配

下面分别介绍I/O通道信号的功能。

SD0～SD7（I/O）：数据总线。这个8位的数据总线是双向传输的，可以用来与插在卡槽中的适配器进行数据传输。

SA0～SA19（O）：这是20位的地址总线，可以传递用来表明CPU和其他外设之间，或DMA控制器与其他外设之间进行数据传输的地址信息。

－IOW（O）：该信号是由CPU或DMA控制器产生的，产生该信号表明地址确定的目标端口正在进行数据传输。

－IOR（O）：该信号是由CPU或DMA控制器产生的，产生该信号表明CPU正在从地址总线确定的端口读取数据。

SMEMW（O）：该信号是由CPU或DMA控制器产生的，产生该信号表明CPU或DMA控制器想要向地址总线所确定的内存空间发送数据。

SMRMR（O）：该信号是由CPU或DMA控制器产生的，产生该信号表明CPU或DMA控制器将要从地址总线所确定的内存空间读取数据。

RESET DRV（O）：在系统重启或硬件复位时，该信号可以给端口或其他设备提供复位信号，该信号属于高电平有效信号。

IRQ2～IRQ7（I）：这些信号主板上可编程中断控制器的中断输入信号。

CLK（O）：该信号是板卡上可以获得的最高频率的信号，而且其频率相当于OSC频率的3倍。

OSC（O）：该信号是－IOW和所有其他闸门信号的时钟信号。早期PC中的OSC频率为4.77 MHz，新的PC上的OSC频率为8 MHz。

ALE（O）：该信号为地址锁存器的使能信号。在CPU与外设或存储器进行数据传输的过程中，CPU会发送相应的地址信息到地址总线上。在原来的CPU中，较低的8位地址线和8位数据总线结合起来使用。该信号ALE就是一个信号分离器，它负责地址信息的分离。但是出现了系统总线之后，地址信息和数据信息已经进行了分离，所以ALE信号仅仅用来作为一个同步信号，通过这个同步信号来表明总线周期的开始。

TC（O）：该信号是由系统的DMA控制器产生的，产生该信号表明有一个通道已经完成了数据传输周期。

AEN（O）：AEN信号是由DMA控制器产生的，产生该信号表明正在进行一个DMA周期的数据传输。DMA周期的数据传输可能是端口的数据读取，也可能是存储器的数据写入。但是，如果不是预先确定，扩展卡上的端口地址不应该响应端口读数据的总线周期。通过AEN信号，板卡上的电路可以检测CPU或DMA控制器是否在使用总线周期，并根据不同的情况做出相应的响应。AEN信号为高电平，表示DMA控制器在使用总线进行数据传输。

I/O CH RDY（I）：该信号由插件板电路来表明CPU或DMA控制器在总线周期中插入了等待状态，最多可以插入10个时钟周期。

I/O CH CK（I）：该电路可以由插入卡来表明主板上出现了错误。这时主板会产生一个与INT2相对应的NMI硬件中断，I/O CH CK信号也会进入低电平状态。

DRQ1～DRQ3（I）：该信号是发送给主板上的DMA控制器的输入信号。当端口设备想要与内存进行数据传输时，该设备就可以使用DMA传输周期。DMA数据传输周期是由DMA控制器来全权负责的。其中DRQ1到DRQ3是DMA控制器的三个输入信号。当系统复位时，系统的ROM中的BIOS设置DRQ1的优先权最高，DRQ3的优先权最低。DMA控制器共有四个通道，其中的DRQ0是主板上用来产生假的读周期，借以刷新动态内存的。

DACK0～DACK3（O）：该四个信号也就是DMA的四个状态输出信号，通过这四个状态信号可以表明DRQ请求的接收情况。当DACK信号线变为逻辑0之后，DMA数据传输周期开始。

Power supply：主板可以向板卡中提供＋5、＋12、－5和－12 V的电压。＋ve的电压可以保证误差在5%之内，而－ve的电压误差可以保证误差在10%之内。

（2）一种PC总线与外设接口连接方法

1）系统结构　系统结构如图3.3-114所示，由硬件和软件两部分组成。软件包括加工控制软件和编程软件；硬件包括计算机、接口电路、驱动电源及步进电机。按零件图纸，调用编程软件生成ISO格式的数控源程序，加工控制软件根据切割代码指令，逐段插补，进行脉冲分配输出进给代码，经接口电路和驱动电源变为进给脉冲，驱动步进电机按规定的轨迹运行。V－f电路把电极丝和工件之间的间隙电压转化为进给脉冲的频率，以实现加工速度的控制。

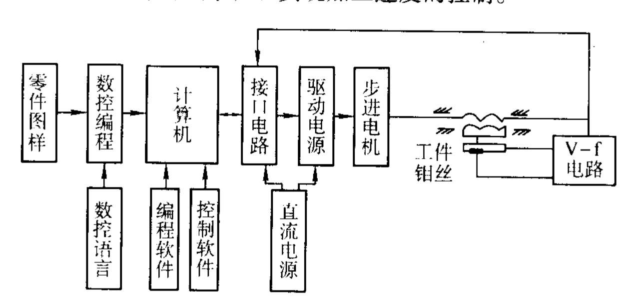


图3.3-114 系统结构框图

2）硬件接口　由PC62芯总线把计算机和控制对象连接起来。从图3.3-115中知，地址总线A0～A9和－IOR、－IOW读写控制组成地址译码器。选通8225，8位并行芯片中的PA，PB，PC口，PC中D0～D7数据，由8225数据口送

入相对应 PA 口和 PB 口，PA 口得到步进电机 x，y 相位状态，通过 x，y 驱动板实现步进电机进给功能。PB 口获得开高频，报警开关信号，通过外设接口电路板，接通相应开关。

PC 口从外设接口电路板将断丝、断电、对中心、变频、短路等信号通过光耦电路输入 PC 口，在 PC 总线 - IOR 读外设，读有效时，将 PC 口内容通过 8255 数据口，挂入 PC 数据总线 D0～D7 上，使 PC 机获取这些信号，作相应处理。

PC 机通过 ISA 系统总线实现了对线切割机各外设接口的控制。

(3) 双 CPU 工作方式，上位机与下位机通信连接方法

1) 采用双 CPU 工作方式，下位机为 80186CPU 组成的单板主控制机，上位机由 PC 机控制，双 CPU 工作方式参阅本章 3.6 节。与 PC 机总线相连的为 AT2500RBQEPLD 可编程逻辑芯片。它是 ATMEL 公司生产，具有 14 个专用输入端和 24 个 I/O 端口的 2500 门级的 EPLD。其管脚图、功能逻辑图分别见图 3.3-116 和图 3.3-117。

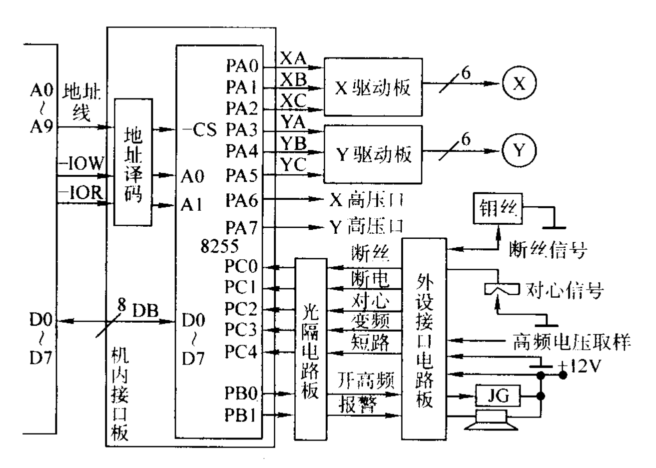


图 3.3-115 硬件接口电路

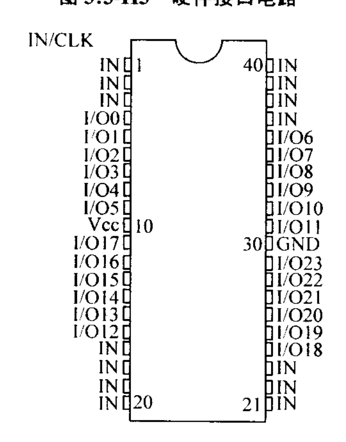


图 3.3-116 AT2500RBQ 管脚图

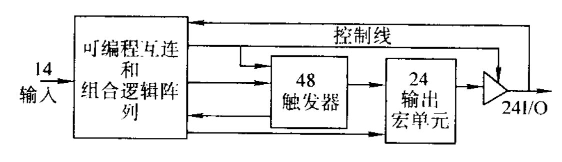


图 3.3-117 功能逻辑图

ATV2500H/L 中的可编程逻辑阵列是由结构相同的 24 个逻辑阵列单元组成。每个逻辑阵列单元有 3 个和项输出，每个和项由 4 个积项组成。另有 5 个积项做 I/O 控制模块中两触发器的时钟信号、异步复位信号和输出三态缓冲器的控制信号用。24 个逻辑阵列单元又划分为 8 组，有 4 组由 4 个逻辑单元组成，另外 4 组由 2 个逻辑阵列单元组成，二者交替排列组成图中所示的可编程逻辑阵列结构。每组各设一条共用的积项线，为该组内所有 I/O 控制模块中的触发器提供局部的同步预置位信号，因此整个逻辑阵列中共有 416 条积项线。阵列中的输入线共有 172 条，分别由 14 个专用输入项（28 条输入线）、24 个 I/O 端做输入项时（48 条输入线）和 24 个 I/O 控制模块反馈的 48 个反馈项（96 条输入线）提供。

每个逻辑阵列单元有上、中、下三路和项输出。在各个逻辑阵列单元和其 I/O 端之间有一个 I/O 控制模块。每个 I/O 控制模块中含有 2 个触发器，I/O 控制模块的等效逻辑功能如图 3.3-118 所示。根据编程控制，当 S2 = 0 时（图中 S2 未示出），构成寄存器输出工作方式，如图 3.3-118a 所示，由 D1 触发器的输出 Q1 经输出三态缓冲器输出到 I/O 端。而 D2 触发器的输出 Q2 则为“内藏”逻辑。Q1 和 Q2 也可通过反馈路径反馈到逻辑阵列中去。由图还可看出，触发器 D1 的输入是由从逻辑阵列单元输出的三路和项中的上、中两路并合成具有 12 个积项和的输出。

当 S2 = 1 时为组合逻辑输出工作方式，如图 3.3-118b 所示。再根据 S0 和 S1 的组合，可得到 4、8 和 12 个积项和的三种组合输出。此时，两触发器的输出 Q1 和 Q2 均为“内藏”式工作方式。

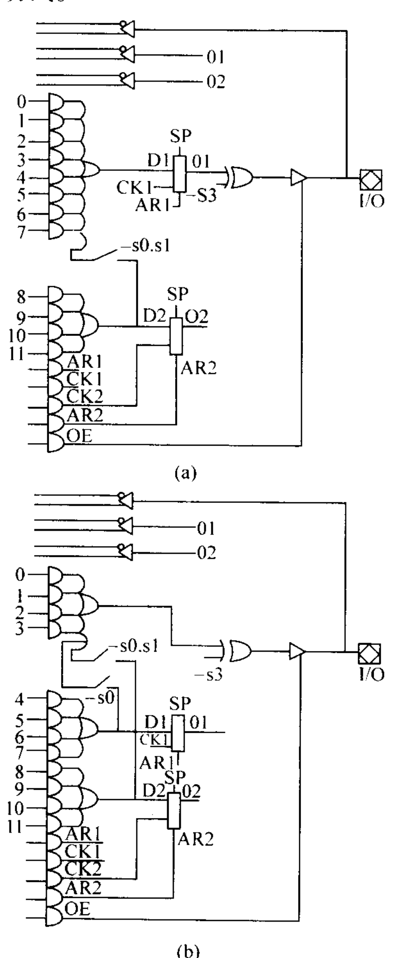


图 3.3-118 I/O 控制模块

由图 3.3-118 可看出其 I/O 的特点。寄存器输出工作方式为：D 触发器输入端口状态由和项输出控制，由一个积项作为时钟信号，将口端状态写入 D 触发器，D 触发器输出端 Q 可由三态缓冲器（由积项 CE）输出到 I/O 端。也可直接进行逻辑编程，作为和项输出到 I/O 端。由于三态缓冲器作



用，当关闭时 I/O 端口可当输入用，这种寄存器工作方式可用在 PC 总线与可编程的逻辑部件数据线通讯上。

2）PC 总线与 AT2500BRQ 可编程芯片连接框图（见图 3.3-119）。

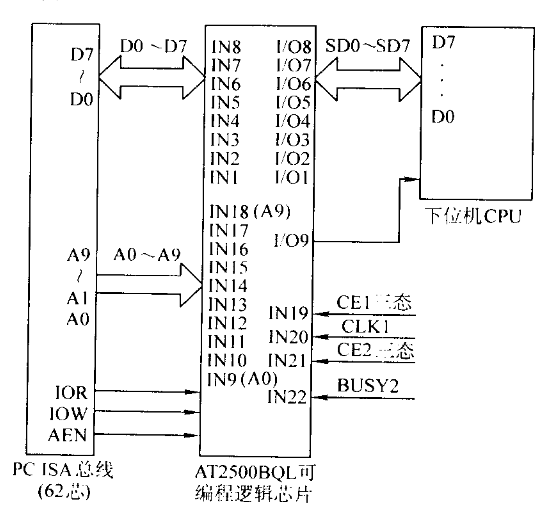


图 3.3-119　PC 总线与 AT2500BRQ 可编程芯片连接框图

① 由 PC 上位机与下位机（单片机）通信　见框图 IN1～IN8，I/O1～I/O8 作为上下位机双向数据端口方式是 I/O 输入输出方式，其输出是由 3 态门控制的 D 型寄存器输出。

PC 机传送加工指令，各种命令及通信应答可从不同的口地址（A0～A9）中数据获得。

PC 机从相应口地址中发送数据到步骤如下。

PC 总线 A0～A9 地址线内容送入 IN9～IN18。

IN22（BUSY2）空状态下，口地址译码有效时，总线上 IOW 口地址写信号生成 CLK2，将总线数据总线 D0～D7 从 IN1～IN8 输入端送往 I/O1～I/O8 的锁存器口端的内容锁存，与此同时，AT2500 的 I/O9 输出端信号送下位机 CPU，下位机 CPU 发出 CE2 经 IN2 输入端，打开 I/O1～I/O8 的锁存器三态门将 PC 总线 D0～D7 数据送入下位机数据口，读取数据。

下位机接收数据成功后，将应答信号通过 I/O1～I/O8 输入口送到 IN1～IN8 数据锁存器 D 端，由 CLK 能把 IN19 送入锁存器中。

PC 机查询应答口地址时，CE1 开放条件下，在 IOR 口地址读信号时，从 IN1～IN8 数据输出挂到 PC 总线 D0～D7 上，PC 机获得相应的应答信号。可由 PC 机继续向下位机输送指令和命令。

在加工过程中，经插补运算进给取得新的轨迹位置和切割变频通过的 A/O 转换信号，通过相应口地址向上位机 PC 数据口传送，传送方式类同于上位机。PC 机获得信号，即实时的轨迹地址，通过计算在屏幕上显示即时点，或若在加工间隙电压波形值显示在高频电压波形窗上。下位机 CPU 将欲送数据通过 I/O1～I/O8 输入送到 IN1～IN8 端口锁存器口端上，由 IN20 CLK 脉冲将数据送入锁存器内等待 PC 获取。PC 机查询相应的下位机发送的口地址。当三态门打开允许 CE1、IOR 读信号，打开 IN1～IN8 输出三态门将下位机的数据读入 PC 机数据总线上，实现下位机向 PC 机传送的功能。

CE2，IN22 及口地址码，组成 I/O1～I/O8 三态控制门，IOW 和口地址及 IN22（BUSY2），作为 I/O1～I/O8 锁存器的时钟 CLK 端。IN20 下位机产生时钟 CLK，作为 IN1～IN8 锁存器写入时钟，CE1 三态打开允许，口地址、IOR 组成三态控制门。

② 下位机（89c196KB）与外设连接作用　下位机进行插补运算，产生 X，Y，U，V 进给量步进电机相位，通过可编程逻辑芯片 AT2500，经光电耦合器放大后连接到各步进电器相线上，实现了实时进给功能，其他外设输入、输出信号，都由 CPU 通过光耦实现控制，如图 3.3-120 所示。

在工作过程中 CPU 将即时改变相位相应口地址，输入 IN8～IN13（低地址 A0～A2，高地址 A12，A13，A14）对应数据线 D3～D7（5 位），经 IN3～IN7 输入端送往 I/O，输出所对应的 5 位锁存器 D 端，经 CPU 产生 CLK 时钟写入锁存器，如果输出 CE 允许（指步进电机合上，输出端三态门常开）相对应 I/O 输出口，输出相应相位线值，经光耦隔离电路。驱动放大电路连接到步进电机相线上，改变相位线状态，实现进给。

I/O1～I/O18 作为触发器输出端，由三态门控制输出，在步进电机开关合上，使输出三态门 CE 允许端打开，所改变相位线状态的一组数据，通过输入端 IN3～IN7 直接从 I/O 口输出。当步进电机开关关闭，输出三态门被禁止输出，切断各相电源，步进电机不工作。

下位机与外设连接可参见图 3.3-121。

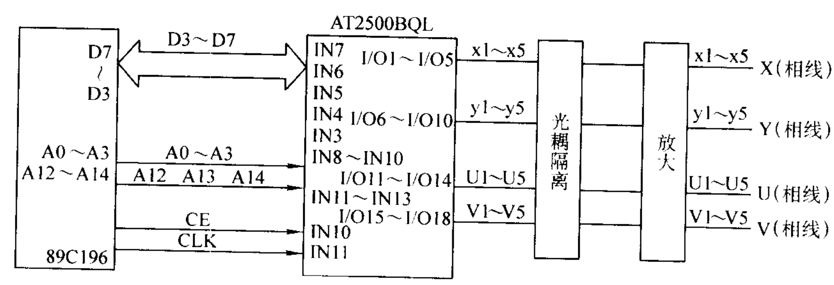


图 3.3-120　下位机（89c196KB）与外设连接

外设输入信号如对中心、限位、断丝、换向变频采样；CPU 输出信号，高频电源开关，全机停信号；高频电源参数设置 RXD，TXD。工作过程如下。

CPU 输入端 IN1～IN4 接收外设断丝信号、机床限位信号，产生停机输出信号。输入端 IN1 接收定边定中心信号，作为 CPU 定位功能操作，控制相应步进电机进给。

CPU 输出端 I/O1，作为高频开关输出信号，当加工时，从 I/O1 取得开关信号，通过继电器的触头，接通电源等，使高频产生脉冲波形进行电火花加工。CPU 输出端 I/O2，当外设断丝、限位以及 PC 上位机暂停信号等，产生全机停信号，通过继电器触头作全机停处理。

取样信号，由工件电极丝间隙电压，经分压光耦分离，由三极管输出相应电压值，经 CPU 模数转换通道，结合上位机限速及取样速度、调节产生中断信号，由此控制插补运算进给的速度。

CPU 串行通信 TXD、RXD 连接高频电源内部 89C2051CPU 的串行口 RXD、TXD 电源各加工参数如脉宽间隔；功率管数，由 PC 机输入下位机，再由下位机 CPU 传送给电频电源串口，用以设置或改变高频电源参数。

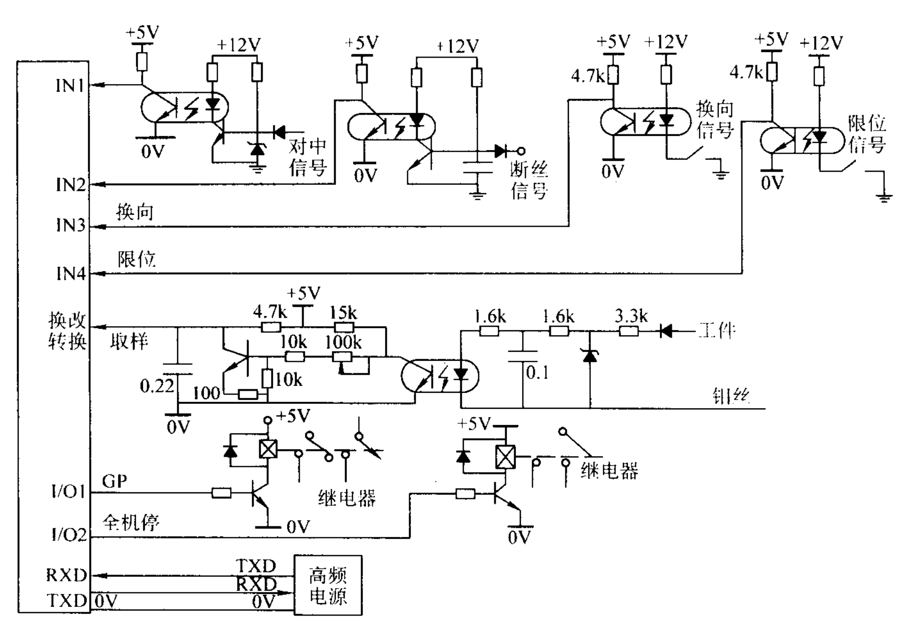


图 3.3-121 下位机与外设连接

7 自动编程

随着计算机技术的飞速发展，国内多种自动编程软件应运而生，使用已越来越普及。微机编程系统类型较多，按输入方式大体可分为：

1）语言式输入；

2）中文或西文菜单及语言式输入并用；

3）采用 AutoCAD 方式输入；

4）鼠标器依图形标注尺寸输入，会话型输入并用；

5）数字化仪器输入；

6）扫描仪输入等等。

从输出方式看，有图形显示、程序打印、图形打印及纸穿孔机输出，还能进行自动切割编程，输出可加工的 ISO 代码，3B、4B 代码等等，通过软盘驱动器和 RS232 串口传输到其他线切割机床控制器中，进行切割加工。

7.1 语言式微机编程

在线切割加工中，编程一直是一个较难解决的问题，受 APT 语言的启发，也有较多的编程系统采用类似于 APT 的编程方法。这类微机编程可分为三部分。

（1）线圆图形编程

1）点定义语句

① 已知点的直角坐标（x，y），定义：$P=x$，y。如图 3.3-122a 所示。

② 已知点的极坐标（ρ，θ），定义：$P=A$，ρ，θ。如图 3.3-122b。这里 ρ 为极径；θ 为极角。

③ 改变下标定义点（即定义坐标相同的点），即 $P=P_i$。见图 3.3-122c。

④ 点平移（直角坐标），即 $P=P_i$。见图 3.3-122d。Δx，Δy 分别为在 x、y 方向上位移动距离。

⑤ 点平移（极坐标），即$P=P_i,A,\rho,\theta$。见图 3.3-123a。

⑥ 用圆心定义点，即 $P=C_i$。见图 3.3-123b。

⑦ 定义圆上一点，即 $P=C_i$，θ。见图 3.3-123c。

⑧ 两直线的交点，即$P=(L_i,L_j)$。见图 3.3-123d。

2）直线定义语句

① 法线式直线，定义：$L=\rho$，α。这里 ρ 为法线长；α 为法向角。见图 3.3-124a。

② 与 x 轴平行的直线，定义：$L=y$，b。这里 b 为直线在 y 轴上的截距。当 $b=0$ 时即为 x 轴。见图 3.3-124b。

③ 与 y 轴平行的直线，定义：$L=x$，a。a 为直线在 x 轴上的截距，当 $a=0$ 时即为 y 轴。见图 3.3-124c。

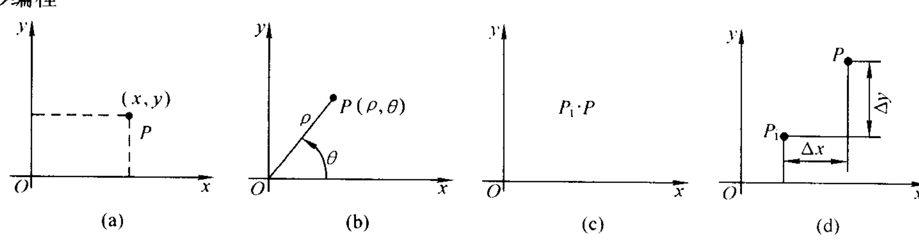
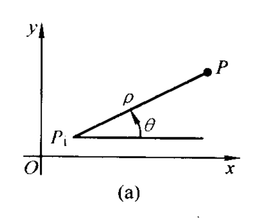
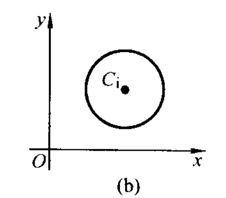
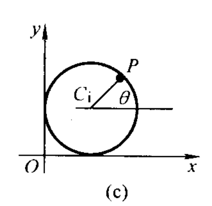


图 3.3-122 点在坐标系中的表示







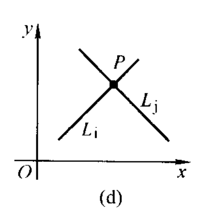


图 3.3-123 点的定义

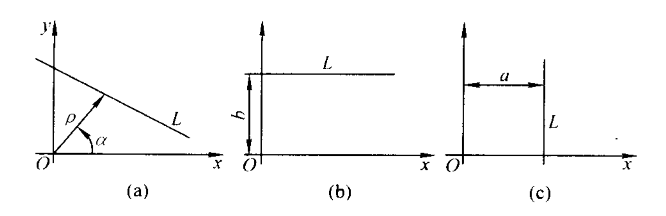


图 3.3-124 直线的定义 1

④ 点斜式直线，定义通过一个给定的点且与 x 轴正向夹角为 β 的直线，即 $L=P_i$，β。见图 3.3-125a。

⑤ 直线的平移，即 $L=L_i$，$\pm d$。d 为两直线间的距离，若平移后使法线增长，d 取正值，使法线缩短，d 取负值。见图 3.3-125b。

⑥ 两点式直线，即 $L=P_i$，P_j。见图 3.3-125c。

⑦ 过已知点且与一已知直线成 α 角的直线，即 $L=P_i$，L_j，α。从 L_j 逆时针至 L 的 α 角取正，顺时针至 L 时的 α 角取负。见图 3.3-125d。

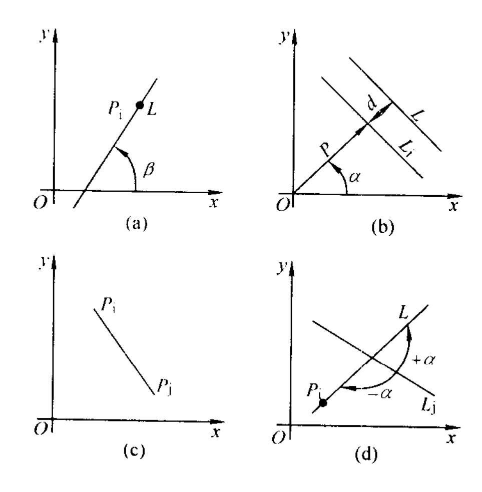


图 3.3-125 直线的定义 2

⑧ 过一点且与圆相切的直线，即 $L=P_i$，C_j。当 C_j 为顺时针方向时，所定义的直线为 L_2，C_j 为逆时针方向时，所定义的直线为 L_1。见图 3.3-126a。

⑨ 与两圆公切的直线，即 $L=C_i$，C_j。过两圆可以作的公切线共有四条，所定义的公切线是哪一条，与两圆的方向有关，两圆同向时为外公切线，反向时为公切线，如图 3.3-126b 所示。

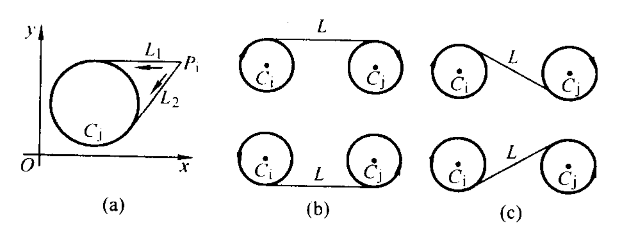


图 3.3-126 圆的切线

3）圆定义语句

① 已知直角坐标圆心，即 $C=x$，y，r。见图 3.3-127a。

② 已知极坐标圆心，即 $C=A$，ρ，θ，r。式中，A 为极坐标标志符；ρ 为极径；θ 为极角。见图 3.3-127b。

③ 以已知圆上一点为圆心，即 $C=C_i$，θ，r。式中，θ 为方向角。注意：当 $r=0$ 时也必须输入 0。见图 3.3-127c。

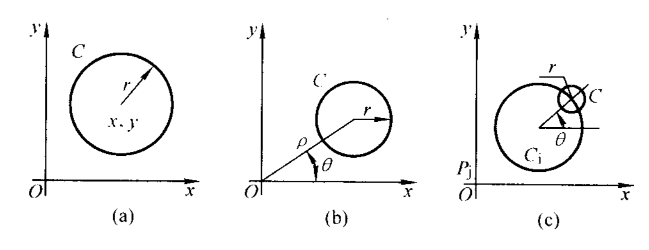


图 3.3-127 圆的定义 1

④ 以两已知圆的交点为圆心，即 $C=C_i$，C_j，β，r。式中，β 为修饰词，$\beta=A$，B，L，R。A 为上交点，B 为下交点，L 为左交点，R 为右交点。见图 3.3-128a。

⑤ 与两圆相切的圆，即 $C=C_i$，C_j，α，β，r。式中，α，$\beta=I$，O。α 指明相切圆是在 C_i 圆之内（I）或是在 C_j 之外（O）。$r=A$、B、L、R，其具体意义与第 5 种圆相同。见图 3.3-128b。

⑥ 以圆与直线的交点为圆心半径为 r 的圆，即 $C=C_i$，L_j，β，r。式中，$\beta=A$、B、L、R 指明交点的位置。见图 3.3-128c。

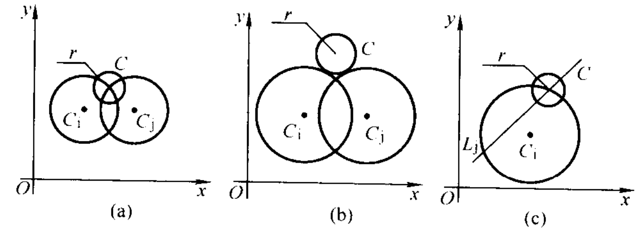


图 3.3-128 圆的定义 2

⑦ 以两直线的交点为圆心，即 $C=L_i$，L_j，r。见图 3.3-129a。

⑧ 以距离点 P_i 为 Δx、Δy 的点为圆心，即 $C=P_i$，Δx，Δy，r。见图 3.3-129b。

⑨ 定义经过三点的圆，即 $C=P_i$，P_j，P_k。圆的方向由三点的排列顺序确定。见图 3.3-129c。

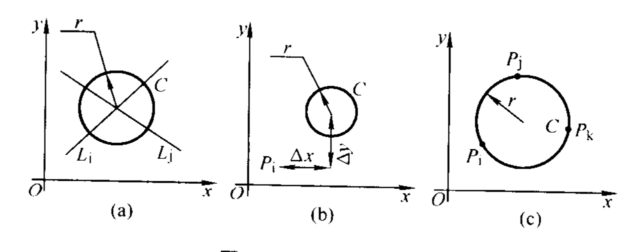


图 3.3-129 圆的定义 3

（2）非圆曲线编程

对一些常用的非圆曲线编程如渐开线齿轮、花键等有一个相对独立的专用软件与它匹配，通常利用函数曲线方程自动计算出一系列点值，用圆弧曲线拟合在给定的误差范围内逼近函数曲线，还有一些采用列表点法，输入计算机内用双圆弧等拟合处理进行编程。用这种方法可以解决列表曲线的编程加工问题。已知曲线方程的函数曲线的编程也能处理螺旋线、椭圆、抛物线、双曲线、内处摆线和正余弦多种函数

曲线。

(3) 编制语言规划

将点线圆编程和非圆曲线编程，利用功能菜单编制可加工的 ISO 或 3B 指令。采用语言式编程必须牢记编程语言规则。

下面通过几个实例来说明具体编程方法。

例：要编一个图形的程序，首先要写出该图的源程序。写源程序之前应对各圆按顺序编号。各交点应看成半径等于零的圆。

① 图 3.3-130 的源程序为

C1 = 0，0，－3.55

C3 = A，3.1，45，－2.1

C2 = C1，C3，A，0

C4 = C2，S，45

C5 = C1

L1 = 3，0

C6 = C5，L1，B，0

P1 = C6

L2 = P1，98

L3 = 7，－90

C7 = L2，L3，0

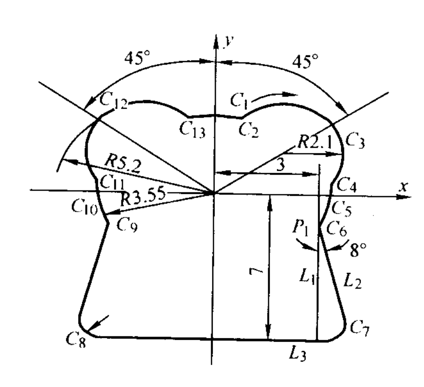


图 3.3-130 编程实例

② 利用键盘将源程序输入微机。在输入源程序过程中，边输入边显示所输入内容，若所输入内容是交点计算的语句，则立即显示出交点计算结果。用↵表示每输完一行源程序后应按回车键，回车键后的内容是对这条源程序语句的解释。

源程序输入过程为：

* C1 = 0，0，－3.55 ↵ C1 圆的圆心坐标（0，0），半径 r = －3.55（顺圆）

* 显示 NO.1 xc = 0 yc = 0 Rc = －3.55

* C3 = A，3.1，45，－2.1 ↵ C3 圆的圆心极坐标（ρ = 3.1，θ = 45°），半径 r = －2.1（顺圆）

* 显示 NO.3 xc = 2.192 031 yc = 2.192 031 Rc = －2.1

* C2 = C1，C3，A，0 ↵ C2 圆的圆心是 C1 和 C3 的上交点，半径 r = 0

* 显示 NO.2 xc = 0.554 268 4 yc = 3.506 464 Rc = 0

* C4 = C2，S，45 ↵ C4 圆是 C2 圆以 45°线为对称轴的对称圆

* 显示 NO.4 xc = 3.506 464 yc = 0.554 268 4 Rc = 0

* C5 = C1 ↵ C5 圆与 C1 圆相同

* 显示 NO.5 xc = 0 yc = 0 Rc = －3.55

* L1 = 3.0 ↵ L1 为法线式线，P = 3，α = 0°

* 显示 NO.1 P1 = 3 α1 = 0

* C6 = C5，L1，B，0 ↵ C6 圆的圆心是 C5 和 L1 的下交点，半径 r = 0

* 显示 NO.6 xc = 3 yc = －1.898 025 Rc = 0

* P1 = C6 ↵ P1 点即 C6 的圆心

* 显示 NO.1 xp = 3 yp = －1.898 025

* L2 = P1，98 ↵ L2 为点斜式线，P = P1，β = 98°

* 显示 NO.2 P1 = 2.706 65 α1 = 8

* L3 = 7，－90 ↵ L3 为法线式线，P = 7，α = －90°

* 显示 NO.3 P1 = 7 α1 = －90

* C7 = L2，L3，0 ↵ C7 的圆心是 L2 和 L3 的交点，半径 r = 0

* 显示 NO.7 xc = 3.717 036 yc = －7 Rc = 0

以上所输入的源程序，把 R = 1 的 C7 圆先计算出 L2 和 L3 两条线的交点，即 C7 所算出的是半径为零的点，后面用尖角修圆的功能使其变为所需要的圆弧。上面只输入图形的右边一半。

左边一半用对称功能就能立即获得。

* SYM ↵

* 对称反射定义：

* 起始过渡圆序号：Ns = ？ 1 ↵

* 终止过渡圆序号：Ne = ？ 7 ↵

* 对称轴类型 －－ [x]，[y]，[O]，[Li]，[L，P，α1]，[α] ↵

* 请输入对称轴：y ↵

调用尖角修圆功能对 C7 和 C8 进行尖角修圆。

* 请选择：1 指定尖角修圆 2 全部尖角修圆 [1，2] 1

* I = ？ 7 ↵

* R = ？ 1 ↵

* I = ？ 8 ↵

* R = ？ 1 ↵

* I = ？ 0 ↵

调用间隙补偿功能进行间隙补偿，所输入的间隙补偿量 F 不必带正负号，只要判别当从图的下方向上切割时，电极丝是在所切图形线左侧还是右侧即可。间隙补偿时尖角不必加过渡圆。

* 补偿方向：1. 左侧 2. 右侧 [1，2]？ 1

* 补偿量：F = 0.07 ↵

在对称、尖角修圆或间隙补偿前或后，可随时调看各图的参数，认为正确无误之后即可调用编程功能进行编程。

* 起点坐标（x，y）：0，5 ↵

* 程序输出格式：

1. 3B 程序 2. ISO－A 代码 3. ISO－I 代码任选一种。

7.2 绘图式自动编程系统

在 CAD/CAM 系统中，图形输入是整个系统的咽喉，大量的设计和加工信息都来源于图形的输入。采用纯语言方式的编程系统，如 APT 等编程方式，它需要操作人员严格按照系统规则语句、语法进行编写，记忆量很大，使用时难记忆，纠正及时性差，直观性差，因而这类编程系统使用极不方便。采用图形化自动编程，使用了交互式绘图编程方式，按图纸标注的尺寸输入等实现了自动编程。输入方式较多可用键盘、鼠标等方法，还提供目标捕捉功能，保证输入的正确性，实现各种功能的自动编程，它还能显示出图形的轮廓编程的结果，出错时随时予以提示纠正，大大简化了编程操作的复杂性，上面提及的种种缺陷都迎刃而解。本节以 CAXA 线切割软件为例介绍自动编程系统。

(1) 窗口布局编程界面

图 3.3-131 即为 CAXA 线切割软件的用户界面。它包括



三大部分：绘图功能区、菜单系统和状态显示与提示。其各部分在界面上的位置如图所示。

1）绘图功能区　绘图功能区为用户进行绘图设计的工作区域，它占据了屏幕的大部分面积。绘图区中央设置有一个二维直角坐标系，是绘图区的缺省坐标系。

2）菜单系统　包括下拉菜单、图标菜单、立即菜单、工具菜单和命令项五个部分。

① 下拉菜单位于屏幕的顶部，平时不显示其位置，为状态显示框所占据，当光标移动到该处时即弹了出来。下拉菜单由一行主菜单及其下拉子菜单组成，主菜单包括文件管理、编辑修改、显示、几何变换、查询、系统设定、工作坐标、工具箱和帮助，每个部分含有若干下拉子菜单。

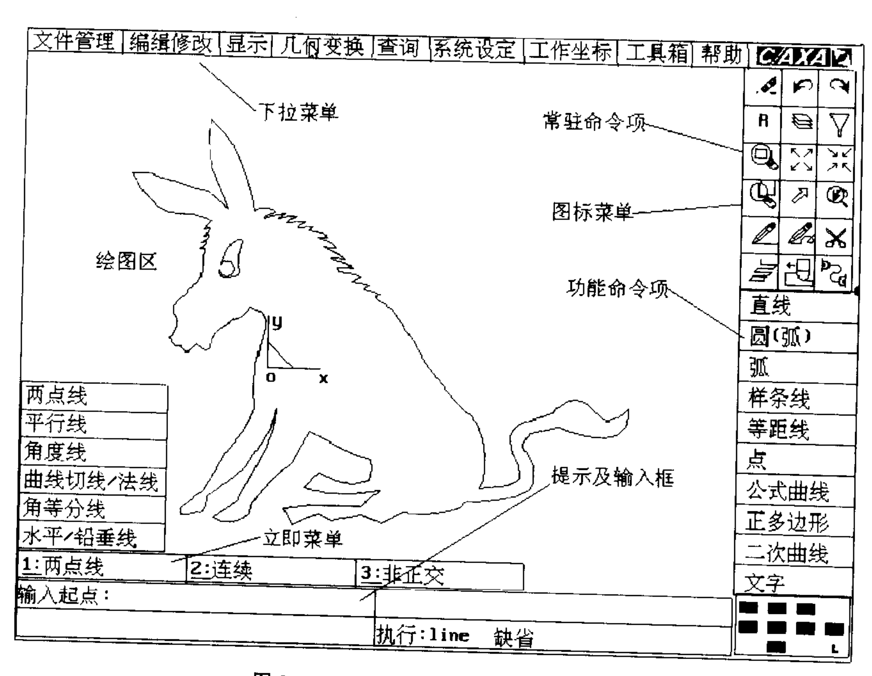


图 3.3-131　CAXA 线切割软件用户界面

② 图标菜单位于屏幕右侧的中部，它包括曲线生成、高级设计、曲线裁剪、切割轨迹生成、G代码和B代码六个部分，每个菜单含有若干命令项。

③ 立即菜单是当功能命令项被选中时，在绘图区的左下角弹出的菜单，它描述了该项命令执行的各种情况和使用条件。用户根据当前的作图要求，正确选择某一项，即可得到准确的响应。

④ 工具菜单包括工具点菜单和拾取元素菜单。

⑤ 命令项包括常驻命令项和功能命令两部分（其位置如图所示）。常驻命令项为下拉菜单中的一些常用命令，为了提高效率，将它们以图标的形式集中在一起组成了常驻命令项。功能命令项对应于图标菜单的各项，选中不同的图标菜单，会显示不同的功能命令项。CAXA 线切割的功能操作主要集中在这里。

3）状态显示与提示　屏幕的上下方为状态显示与提示框，显示当前文件、当前坐标、当前命令以及对用户操作的提示等。它包括当前点坐标显示、操作信息提示、工具菜单状态提示、点捕捉状态提示和命令与数据输入五项。

（2）基本操作

1）点的输入

① 键盘输入　由键盘输入点是通过输入点的 x、y 坐标值以达到输入点的目的。点的坐标分为绝对坐标和相对坐标两种，绝对坐标输入只需输入点的坐标值，它们之间用逗号隔开。相对坐标输入在输入时需在第一个数值前加一个符号@。例如：输入@20，10 表示输入下个相对于前一点的坐标为 20，10 的点。

② 鼠标输入　鼠标输入是指通过移动鼠标选择需要的点，按下鼠标左键，该点即被选中。

③ 工具点的捕捉　工具点是指作图过程中有几何特征的圆心点、切点、端点等点。而工具点捕捉就是利用鼠标捕捉工具点菜单中的某个特征点。当需要输入特征点时，按空格键即可弹出工具点菜单，它包括以下内容：

(S) 屏幕点、(E) 端点、(M) 中点、(I) 交点、(C) 圆心、(D) 增量点、(P) 垂足点、(T) 切点、(N) 最近点、(K) 控制点、(O) 刀位点、(G) 存在点、(F) 缺省

2）实体的拾取　拾取实体是根据需要在已经绘出或生成的直线、圆弧等实体中选择需要的一个或多个。实体的拾取是经常要用到的操作，需熟练掌握。当交互操作处于拾取状态时，按下空格键盘可弹出拾取元素菜单，包括以下几项。

① 单个拾取——用鼠标逐个点取所需实体。

② 窗口拾取——用鼠标点击两点，拉出一个矩形区域（窗口）进行拾取，

注意：当鼠标从左向右拾取时，只有全部包含在窗口内的实体才被选中，而从右向左拾取时，只要窗口含有该实体的一部分该实体即被选中。

③ 全部拾取——拾取图中所有实体。

④ 取消拾取——取消已经拾取了的实体。

拾取元素菜单中的前两项可不需弹出菜单而直接使用。注意：绘图时的拾取元素菜单同生成轨迹时的拾取元素菜单不同，需区别对待。

3）立即菜单的操作　在输入某些命令时，绘图区左下角会弹出一行立即菜单。如输入画直线的命令（从键盘输入“line”或用鼠标点击相应的命令），系统立即弹出如图 3.3-132 所示菜单及相应的操作提示：

1: 两点线	2:连续	3: 非正交
输入起点:		

图 3.3-132　弹出菜单选项

此菜单表示当前待画的直线为两点线方式，非正交的连续直线。同时下面的提示框显示“输入起点:”。用户按要求输入起点后，系统会提示“输入终点:”。立即菜单的主要作用是可以选择某一命令的不同功能。如上例，如果像画一条正交直线，可用鼠标点取“3：非正交”或利用快捷（Alt + 3）将其切换为“3：正交”。另外还可以点取“1：两点线”选择不同的画直线方式（平行线、角度线、曲线切线/法线、角等分线、水平/铅垂线）。

下面用一个简单的例子来体会上述这些基本操作。首先选取功能命令项中的“圆（弧）”命令，选择“1：圆心 + 半径”、“2：圆”模式，系统提示“输入圆心点:”从键盘输入 0，0 后，按提示继续输入半径 20，屏幕上即画出一个圆，按鼠标右键结束命令。用同样的方法在旁边在画一个圆，如图 3.3-133 所示。

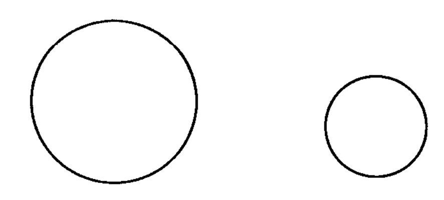


图 3.3-133　圆的输入

接着，选取“直线”命令，用“1：两点线”“2：连续”“3：非正交”模式，系统输入起点时，按下空格键，此时弹出点工具菜单，如图 3.3-134 所示。

(S) 屏幕点
(E) 端点
(M)中点
(I) 交点
(C) 圆心
(D) 增量点
(P) 垂足点
(T) 切点
(N)最近点
(K)控制点
(O) 刀位点
(G) 存在点
(F) 缺省

图 3.3-134　弹出工具菜单

一条切线。用户必须注意的是，在拾取圆时，拾取的位置不同，则切线绘制的位置也不同。

图 3.3-135 和图 3.3-136 是选取不同位置时画出的不同切线。

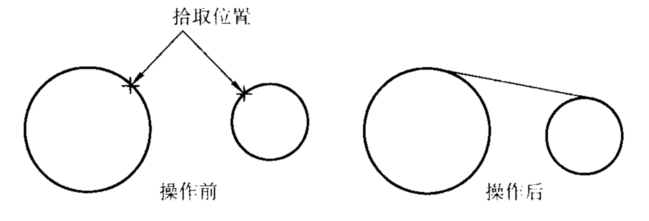


图 3.3-135　圆的外公切线

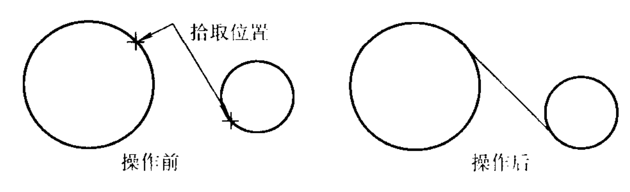


图 3.3-136　圆的内公切线

（3）绘图式自动编程系统结构

1）为了方便操作者的输入，系统提供基本绘图、标准曲线、标准件输入等多种图形输入方法。基本绘图部分提供了直线圆、圆弧、正多边形等绘图方法，标准曲线绘图部分提供抛物线、椭圆、双曲线等多种标准曲线、样条曲线、公式曲线、列表曲线等绘图方法。它还提供了过定点直线与圆相切输入、圆内外公切线输入、三圆的内外公切圆输入、单圆与二直线的公切圆输入、双圆与单直线公切圆输入等多种相关元素输入方法。

2）图形编辑功能有复制、镜象对称、旋转、阵列、移动等，在进行交互式绘图的同时，可以进入捕捉状态直接捕捉水平、垂直、曲线端点、中点、圆心（圆或圆弧）。可方便进行删除、恢复、图形放大缩小。

3）为了增加系统的开放性，支持多种格式图形文件输入数据接口，可读入和输出 ExB、DxF、IGES、AuTOP 等格式文件。

4）可方便查询各点的坐标、两点距离、角度、元素的属性及本次使用软件所进行的所有操作。

5）对已有曲线进行裁剪，处理曲线间的过渡关系（圆角、倒角、尖角），可将曲线打断分为二部分，将首尾相连一组曲线组合成一条曲线或将组合成曲线拆散为首尾相连的一组曲线。绘制轮廓等距线。

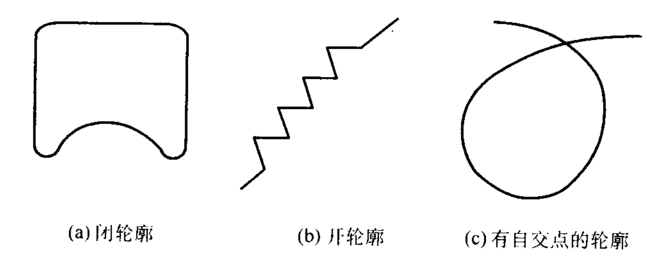
7.3　切割编程

使用绘图软件包和各种绘图工具，把图纸上图形尺寸和形状都记录在计算机内，数控线切割编程就是把这些要加工图形数据通过切割编程产生能加工的指令代码，如 ISO、3B 等，送入控制器内进行切割加工。

（1）切割轨迹生成

1）轮廓　轮廓是一系列首尾相接曲线的集合。在进行数控编程、交互指定待加工（参见图 3.3-137）图形时，常常需要用户指定图形的轮廓，用来界定被加工的区域或被加工的图形本身。如果轮廓是用来界定被加工区域的，则要求指定的轮廓是闭合的；如果加工的是轮廓本身，则轮廓也可以不闭合。对所有的轮廓，要求其不应有自交点。

2）轨迹生成　加工轨迹是加工过程中的实际切割路径。轨迹的生成是在已经构造好的轮廓基础上，根据加工要求，结合加工工艺，确定加工方法和加工条件，由计算机自动计算出加工轨迹，生成切割代码。



(a) 闭轮廓　　(b) 开轮廓　　(c) 有自交点的轮廓

图 3.3-137　轮廓

① 补偿量的确定　由于作为电火花切割加工的电极丝具有半径 R 和加工时的放电间隙 δ 的存在，因而要获取如图工件的凸模与凹模，计算机必须计算外凸或内凹的轨迹，这两条轨迹是原图形轨迹的等距扩大（缩小）轨迹，参见图 3.3-138。因而有间隙补偿量的产生：外偏 $f_{凸}=R+\delta$，内偏 $f_{凹}=-(R+\delta)$，这里的 $f_{凹}$、$f_{凸}$ 仅区别为位置上的差异。R 为电极丝半径，δ 为放电间隙（一般约 0.005～0.03）。

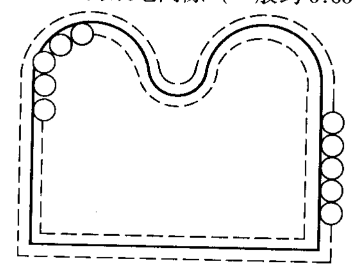
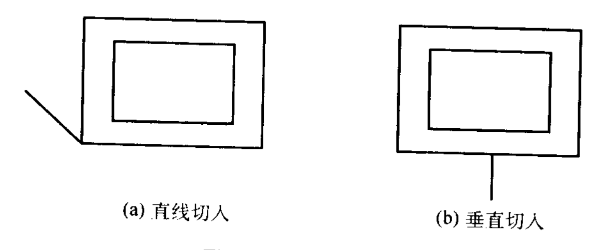


图 3.3-138　补偿量

如果加工的工件尺寸含公差配合，此时总偿量应为：$f_{凸}=(R+\delta)+\Delta$ 公差配合，$f_{凹}=-(R+\delta)+\Delta$ 公差配合，Δ 公差配合带符号。从图 3.3-138 可看出，一旦加工路径确定，相应的圆、线走向也确定，根据加工的要求，任取一段圆弧（线），如果顺圆（顺线）为外偏（正补偿），则图形中所有的顺圆（顺线）均作正补偿，此时逆圆逆线均为负补偿；反之，如果逆圆逆线为外偏，作正补偿，那么所有顺圆顺线为内偏，作负补偿。计算机根据内外偏的补偿量和原图形的图形数据归并计算生成新的偏移轨迹代码。

② 切入方式　在线切割加工中，如果对起始切入位置有特殊要求时，可选择切入方式。切入方式有两种选择："直线方式" 和 "垂直方式"，如图 3.3-139 所示。



(a) 直线切入　　(b) 垂直切入

图 3.3-139　切入方式

直线切入方式：丝直接从穿丝点切入到加工起始段的起始点。

垂直切入方式：丝从穿丝点垂直切入到加工起始段，以起始段上的垂点为加工起始点。当在起始段上找不到垂点时，丝直接从穿丝点切入到加工起始段的起始点，此时等同于直线方式切入。

③ 生成轨迹

a) 点击线切割加工工艺参数窗填入　按确定条切入方式、锥度角度以及补偿量，填入图 3.3-140 所示窗口。注：锥度角度，做锥度加工时，电极丝倾斜的角度，系统规定当输入的锥度为正值，采用左锥度加工，当输入锥度角度为负值时，为右锥度加工，左、右锥是指加工轨迹为正方向，向左或右倾的角度。输入左右锥度可得到加工锥度，上大下小或上小下大图形有关指令，可在斜度加工时，结合二导轮中心锥及下导轮中心到刃口面高度，来进行锥度加工。

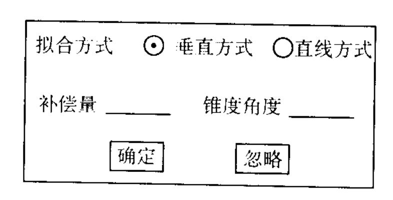


图 3.3-140　工艺参数窗口

b) 拾取轮廓线　在确定加工的偏移量后，系统提示拾取轮廓（参见图 3.3-141）。

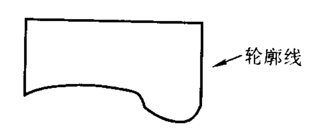


图 3.3-141　拾取轮廓线

拾取轮廓线可以利用曲线拾取工具菜单。当系统提示拾取轮廓线时，击空格键可弹出对应的工具菜单，如图 3.3-142。其中，工具菜单提供三种拾取方式：单个拾取、链拾取和限制链拾取。另外，用户可通过拾取取消功能改变轮廓拾取。

(S) 单个拾取
(C) 链拾取
(L) 限制链拾取
(U) 拾取取消

图 3.3-142　工具菜单

ⅰ）单个拾取　需用户挨个拾取需同时处理的各条轮廓曲线。适合于曲线数量不多同时不适合使用 "链拾取" 功能的情形。

ⅱ）链拾取　需用户指定起始曲线及链搜索方向，系统按起始曲线及搜索方向自动寻找所有首尾相接的曲线。适合于需批量处理的曲线数目较多同时无两根以上曲线搭接在一起的情形。

ⅲ）限制链拾取　需用户指定起始曲线、搜索方向和限制曲线，系统按起始曲线及搜索方向自动寻找首尾相接的曲线至指定的限制曲线。适用于避开有两根或两根以上曲线搭接在一起的情形，从而正确拾取所需的曲线。

ⅳ）拾取取消　在拾取轮廓的过程中，用户可通过此功能取消掉最近拾取的一条轮廓线。

c) 轮廓线拾取方向　当拾取第一条轮廓线后，此轮廓线变为图 3.3-143 所示的细实线。系统给出提示：选择链搜索方向，此方向表示加工方向，同时也表示拾取轮廓线的方向。

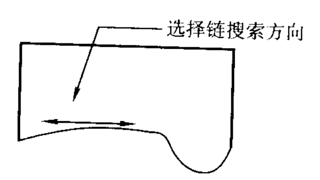


图 3.3-143　轮廓线拾取方向

d）选择方向后，如果采用的是链拾取方式，则系统自动拾取首尾相接的轮廓线；如果采用单个拾取方式，则系统提示继续拾取轮廓线；如果采用限制链拾取，则系统自动拾取该曲线与限制曲线之间连接的曲线。

选择加工的侧边：当拾取完轮廓线后，系统要求选择切割侧边，即丝偏移的方向，生成加工轨迹时将按这一方向自动实现丝的补偿，它是由鼠标点击图形中内外箭头的一方来确定补偿量的正负号（参见图 3.3-144）。

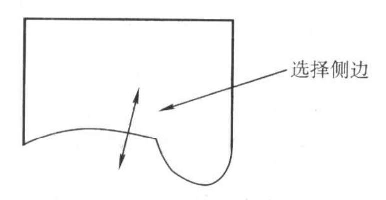


图 3.3-144　选择加工的侧边

e）指定穿丝点位置及丝最终切到的位置　穿丝点的位置必须指定。加工轨迹将按要求自动生成，至此完成线切割加工轨迹的生成。

3）一种轨迹生成处理

① 用光标在编程按钮上点击命令键，弹出菜单，在切割编程上轻点命令键，屏幕左下角出现工具包图符，从工具包图符中可取出丝架状光标，屏幕右上方显示“丝孔”，提示用户选择穿孔位置。位置选定后，按下命令键，再移动光标（命令键不能释放），拉出一条连线，使之移到要切割的首条线段上（移到交点处光标变成‘x’形，在线段上为手指形），释放命令键。该点处出现一指示牌‘▲’，屏幕上出现加工参数设定窗口（图 3.3-145）。此时，可对孔位及补偿量、平滑（尖角处过渡圆半径）作相应的修改。补偿量正负是由 $f_{凸}$、$f_{凹}$ 算式确定，【YES】认可后，参数窗消失，出现“路径选择窗口”（图 3.3-146）。

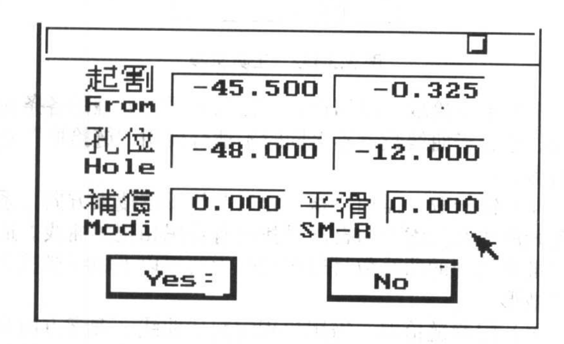


图 3.3-145　加工参数设定窗口

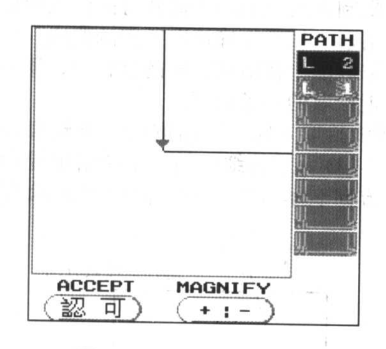


图 3.3-146　路径选择窗口

②“路径选择窗”中的红色指示牌处是起割点（参见图 3.3-146），左右线段表示工件图形上起割点处的左右各一线段，分别在窗边用序号代表（C 表示圆弧，L 表示直线，数字表示该线段作出时的序号：0～n）。窗中“＋”表示放大钮，“－”表示缩小钮，根据需要用光标每点一下就放大或缩小一次。选择路径时，可直接用光标在序号上轻点命令键，序号变黑底白字，光标轻点“认可”即完成路径选择。当无法辨别所列的序号表示哪一线段时，可用光标直接指向窗中图形的对应线段上，光标呈手指形，同时出现该线段的序号，轻点命令键，它所对应段的序号自动变成黑色。路径选定后光标轻点“认可”。“路径选择窗”即消失，同时火花沿着所选择的路径方向进行模拟切割，到“OK”结束。如工件图形上有交叉路径，火花自动停在交叉处，屏幕上再次弹出“路径选择窗”。同前所述，再选择正确的路径直至“OK”。系统自动把没切割到的线段删除，成一完整的闭合图形。

火花图符走遍全路径后，屏幕右上角出现“加工开关设定窗”（图 3.3-147），其中有五项选择：加工方向、锥度设定、旋转跳步、平移跳步和特殊补偿。



图 3.3-147　加工开关设定窗

③ 加工方向有左右向两个三角形，分别代表逆/顺时针方向，红底黄色三角为系统自动判断方法（特别注意：系统自动判断方向一定要和火花模拟走的方向一致，否则得到的程序代码上所加的补偿量正负相反。）。若系统自动判断方向与火花模拟切割的方向相反，可用命令键重新设定：将光标移到正确的方向位，点一下命令键，使之成为红底黄色三角。这种方法有时会产生电脑显示方向和手工编程方向不一致，这时要点击来改变电脑显示方向。不注意这一点，会使补偿量取反。当采用 ISO 或 3B 指令编程，由于图形走向已定，但未告之，故在进行切割编程时必须正确判定图形总挠度方向，方可确定正确的间隙补偿和锥度编程。可采用判别加过渡圆方式来确定编程总挠度方向，也可避免电脑显示方向与手工方向不一致的情况。

对封闭图形的总挠度方向的确定，可以用加过渡圆的方法来判断，具体方法如下。

首先遍历该图形数据链表或切割代码，找出图形中最左侧（右侧、上侧、下侧皆可），此处以找左侧的点为例，该点可能在线段上，也可能在端点上，若同时出现多个这样的点，则取这些点中最上方的一个。所找到的点即为图形最外侧的点。然后在最左侧点的位置部位确认或添加假想过渡圆，取得圆的运动方向即为图形总挠度方向。

若点在线段上，因为该点为图形最左侧的点，若该点所在线段为直线，则直线必然垂直，又由于该点为所有最左侧点中最上方一个，故该点必然为垂直线的上端点。采用下述直线与直线交过渡圆法，若该点落在圆弧上，该圆弧的方向即为整个图形的走向（见图 3.3-148a）。

若点在端点上，又可分为两种情况：一种是直线与直线交于该点，则在该点作两直线的过渡圆，所得过渡圆走向即为整个图形的总挠度方向，见图 3.3-148b。此过渡圆不必在程序中真实添加，只需求出顺逆方向即可。另一种情况是直线与圆弧交于该点，一般直线与圆弧于该点有两种相交模式：相交或相切。直线与圆弧相交，则很容易在该点加过渡

圆；若直线与圆弧相切，则分两类：图 3.3-149a 中不可加过渡圆，图 3.3-149b 中可加过渡圆。下面分两种情况讨论。

直线与圆弧之间可加过渡圆时，过渡圆的方向即为图形的总挠度方向（见图 3.3-148c）。

直线与圆弧之间不可加过渡圆时，该圆弧的方向即为图形的总挠度方向。

同直线与圆弧相类似，圆弧与圆弧也可分为可加过渡圆与不可加过渡功圆两类。图 3.3-150a 为不可加过渡圆，图 3.3-150b 为可加过渡圆。

圆弧与圆弧之间可加过渡圆时，过渡圆的方向即为整个图形的挠度方向（见图 3.3-148d）。

圆弧与圆弧之间不可加过渡圆时，两圆弧中前一段的圆弧方向即为整个图形的挠度方向。

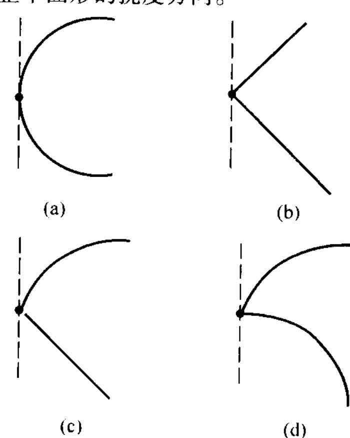


图 3.3-148　图形总挠度方向的确定

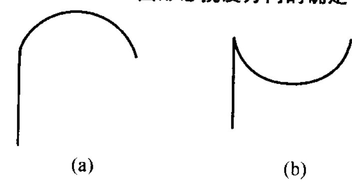


图 3.3-149　过渡圆 1

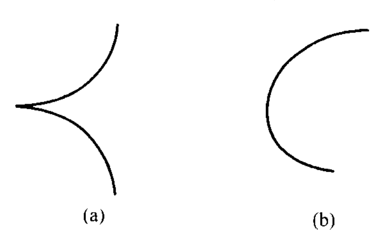


图 3.3-150　过渡圆 2

④ 锥度设定　加工锥度时，要进行锥度参数设定。光标按“锥度设定”的 ON 钮，使之变蓝色，出现锥度参数窗。（图 3.3-151）参数窗中有斜度、标度、基面三项参数输入框，分别输入相应的数据。

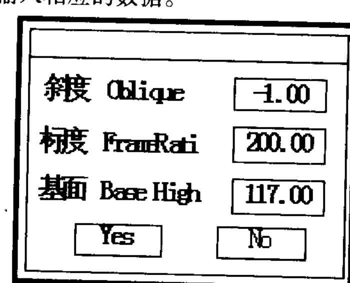


图 3.3-151　参数修正窗口

斜度：电极丝的倾斜角度，在正负方向。工件上小下大为负；上大下小为正。

标度：上下导轮中心间的距离或旋转中心至上导轮中心的距离（或对应的折算量），单位为毫米。

基面：在十字拖板工机床上中，由于下导轮的中心不在工件刃口面上，需对刃口坐标进行修正。基面为下导轮（或旋转）中心到工件刃口面的距离。

设置：斜度 = 1.5，标度 = 200，基面 = 50。

本例无跳步和特殊补偿设定，可直接用光标轻点加工参数设定窗右上角的小方块‘■’按钮，退出参数窗。屏幕右上角显示红色“丝孔”提示，提示用户可对屏幕中的其他图形再次进行穿孔、切割编程。系统将以跳步模的形式对两个以上的图形进行编程。因本例无此要求，可将丝架形光标直接放回屏幕左下角的工具包（用光标轻点击工具包图符），完成切割编程。

上述这种轨迹生成斜度加工是直接生成可加工的斜度 G 指令，它将上下线架距离 H，下线架到刃口面距离 h 和斜度角度（上大下小为正，上小下大为负）参数直接输入，参与计算生成指令，针对性较强，只能在本机床直接加工。如果要在其他机床上加工斜度，必须在切割编程时，正确输入 H、h、α 三个斜度量。如果供其他机器使用的程序必须输入其他机器的 H、h，这里没有提供 ISO 进行间隙补偿和锥度倾斜 ISO 指令和 4B 指令（参见图 3.3-152）。

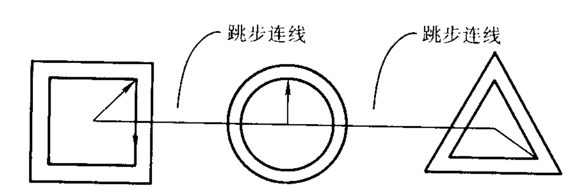


图 3.3-152　跳步后轨迹及跳步连线

（2）轨迹跳步生成

上面是针对一个图形切割编程，当要完成多个加工轨迹跳步编程时，只要对各个图形分别输入相应的间隙补偿量，确定每个图形加工方向和穿丝孔位及起始切割点，完成切割编程后系统会自动连接各图形穿丝孔的连线，生成跳步图形的加工指令。

（3）指令代码生成

自动编程系统可使图形依作图直观方式和参数输入绘成图形，进入切割编程模块，重新进行轨迹运算生成系统，扩大缩小图形和轨迹，它可根据各种加工机床加工特性，转移生成相对应的 G 指令和 3B、4B 指令，与各机床相对应，这类自动编程有一后置处理模块。

1）G 代码　G 代码处理功能就是结合特定机床把系统生成的加工轨迹转化成机床代码 G 指令，生成的 G 指令可以直接输入数控机床用于加工。系统的最终目的，考虑到生成程序的通用性，软件针对不同的机床，可以设置不同的机床参数和特定的数控代码程序格式，同时还可以对生成的机床代码的正确性进行校核。

本节主要介绍线切割加工 G 代码的生成和校核方法。用户将鼠标指针移动到屏幕右侧的系统模块菜单区中间的两排图标上，当鼠标停留在第二排中间的图标上一段时间，则会在相应位置弹出一个亮黄底色的提示条：“G 代码”。用左键点取该模块图标后，系统在功能菜单区弹出其子功能的菜单，如图 3.3-153。

① 增加机床　选取“增加机床”功能项，则弹出一个需要用户填写的参数对话框，如图 3.3-154 所示。

参数配置包括开关走丝、数值插补方法、补偿方式、冷却控制、程序起停以及程序首尾控制符等。现以某系统参数

配置为例，具体配置方法如下。

增加机床

后置设置

生成G代码

校核G代码

图 3.3-153　子菜单选项

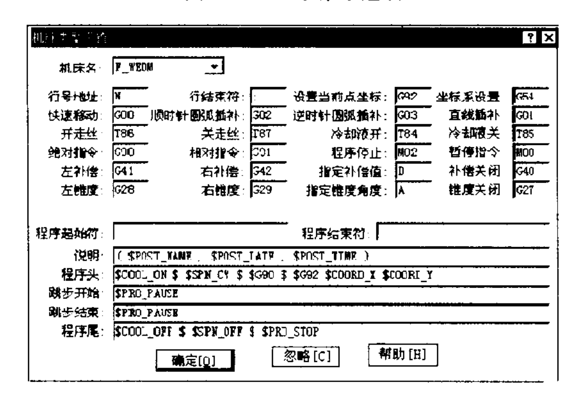


图 3.3-154　机床参数对话框

(a) 机床参数设置　在“机床名”一栏中输入新的机床名或用鼠标点取“↓”键选择一个已存在的机床进行修改。对机床的各种指令地址进行配置。可以对如下选项进行配置。

a) 行号地址〈Nxxxx〉　一个完整的数控程序由许多的程序段组成，每一个程序段前有一个程序段号，即行号地址，系统可以根据行号识别程序段。如果程序过长，还可以利用调用行号很方便地把光标移到所需的程序段。行号可以从1开始，连续递增，如N0001、N0002、N0003等，也可以间隔递增，如N0001、N0005、N0009等。建议用户采用后一种方式。因为间隔行号比较灵活方便，可以随时插入程序段，对原程序进行修改，而无需改变后续行号。如果采用前一种连续递增的编号方式，每修改一次程序，每加入一个程序段，都必须对后续的程序段的行号进行修改，很不方便。

b) 行结束符〈;〉　在数控程序中，一行数控代码就是一个程序段。数控程序一般以特定的符号而不是以回车键作为程序段结束标志，它是一段程序段不可缺少的组成部分。系统不同，程序段结束符一般不同。有些系统以分号符“;”作为程序段结束符，有的系统的结束符是“*”，有的是“#”等等。一个完整的程序段应包括行号、数控代码和程序结束符。如：

N10G92x10.000y5.000;

c) 插补方式控制　一般地，插补就是把空间曲线分解为X、Y、Z各个方向的很小的曲线段，然后以微元化的直线段去逼近该空间曲线。数控系统都提供直线插补和圆弧插补，其中圆弧插补又可分为顺圆插补和逆圆插补。

插补指令都是模代码。所谓模代码就是只要指定一次功能代码格式，以后就不用指定，系统会以前面最近的功能模式确认本程序段的功能。除非重新指定同类型功能代码，否则以后的程序段仍然可以默认该程序代码。

直线插补 < G01 >：系统以直线段的方式逼近该点。需给出终点坐标。如：G01x100.000y100.000表示丝将以直线的方式从当前点到达点（100，100）。

顺圆插补 < G02 >：系统以半径一定的圆弧的方式按顺时针的方向逼近该点。要求给出终点坐标、圆弧半径以及圆心坐标。如：G02x100.000y100.000R20.000表示丝将以当前点，终点（100，100），圆心（50，50）所确定的圆弧的方式，按顺时针方向从当前点到达目的点（100，100）。G02x100.000y100.000I50.000J50.000表示丝将以当前点，终点（100，100），圆心（50，50）所确定的圆弧的方式，按顺时针方向从当前点到达目的点（100，100）。

逆圆插补 < G03 >：系统以半径一定的圆弧的方式按逆时针的方向逼近该点。要求给出终点坐标、圆弧半径以及圆心坐标。如：G03x100.000y100.000R20.000表示丝将以半径为$R20$的圆弧的方式，按逆时针方向从当前点到达目的点（100，100）。

d) 开关走丝指令　开走丝〈T86〉，关走丝〈T87〉。

e) 冷却液开关控制指令　冷却液开〈T84〉：T84指令控制打开冷却液阀门开关，开始开放冷却液。冷却液开〈T85〉：T85指令控制关闭冷却液阀门开关，停止开放冷却液。

f) 坐标设定　用户可以根据需要设置坐标系，系统根据用户设置的参照系确定坐标值是绝对的还是相对的。

标设定 < G54 >：G54是程序坐标系设置指令。一般地，以零件原点作为程序的坐标原点。程序零点坐标存储在机床的控制参数区。程序中不设置此坐标系，而是通过G54指令调用。

绝对指令 < G90 >：G90把系统设置为绝对编程模式，以绝对模式编程的指令，坐标值都以G54所确定的工作零件为参考点。绝对指令G90也是模代码，除非被同类型代码G91所代替，否则系统一直默认。

相对指令 < G91 >：G91把系统设置为相对编程模式，以相对模式编程的指令，坐标值都以该点的前一点为参考点，指令值以相对递增的方式编程。同样，G91也是模代码指令。

设置当前点坐标 < G92 >：把随后跟着的x、y值作为当前点的坐标值。

g) 补偿　左补偿 < G41 >：指加工轨迹以进给的方向为正方向，沿轮廓左边让出一个给定的偏移量。

右补偿 < G42 >：指加工轨迹以进给的方向为正方向，沿轮廓右边让出一个给定的偏移量。

补偿关闭 < G40 >：补偿的关闭是通过代码G40来实现的。左右补偿都是用代码指令，所以，也可以通过开启一个补偿指令代码来关闭另一个补偿指令代码。

h) 暂停指令 < M00 >　程序暂停指令M00将暂停程序的运行，等待机床操作者的干预。确认进行加工后，可继续执行暂停指令后面的指令进行加工。

i) 程序止 < M02 >　程序结束指令M02将结束整个程序的运行、所有的功能G代码和与程序有关的一些运行开关。如冷却液开关、走丝开关、机械用手开关等都将关闭处于原始禁止状态。机床处于当前位置，如果要使机床停在机床零点位置，则必须用机床使之回零。

j) 锥度设置

锥度 < G28 >：指加工轨迹以进给的方向为正方向，向左倾斜给定的角度。

右锥度 < G29 >：指加工轨迹以进给的方向为正方向，向右倾斜给定的角度。

锥度关闭 < G27 >：锥度的关闭是通过代码G27来实现的。

锥度角度表示 < A >：其后跟着的数值表示锥度的角度。如：G28A2.000表示丝向左倾斜2.0度。

(b) 程序格式设置　程序格式设置就是对G代码各程序段格式进行设置。“程序段”含义见G代码程序示例。用户可以对以下程序段进行格式设置：程序起始符号、程序结

束符号、程序说明、程序头、程序尾换刀段。

a) 设置方式　字符串或宏指令@字符串或宏指令。其中宏指令为：$ + 宏指令串，系统提供的宏指令串有：

* 当前后置文件名	POST _ NAME
* 当前日期	POST _ DATE
* 当前时间	POST _ TIME
* 当前 X 坐标值	COORD _ x
* 当前 Y 坐标值	COORD _ y
* 当前程序号 P	OST _ CODE

以下宏指令内容与前图中的设置内容一致。

* 行号指令	LINE _ NO _ ADD
* 行结束符	BLOCK _ END
* 直线插补	G01
* 顺圆插补	G02
* 逆圆插补	G03
* 打开锥度	G28
* 关闭锥度	G27
* 绝对指令	G90
* 相对指令	G91
* 设置当前点坐标	G92
* 开走丝	SPN _ CW
* 关走丝	SPN _ OFF
* 冷却液开	COOL _ ON
* 冷却液关	COOL _ OFF
* 程序止	PRO _ STOP
* 程序暂停	PRO _ PAuSE
* 左锥度	ZD _ LEFT
* 右锥度	ZD _ RIGHT
* 关闭锥度	ZD _ CLOSE

@号为换行标志。若是字符串则输出它本身，若是$ 号则输出空格。

b) 程序说明　说明部分是对程序的名称、与此程序对应的零件名称编号、编制日期和时间等有关信息的记录。程序说明部分是为了管理的需要而设置的。有了这个功能项目，用户可以很方便地进行管理。比如要加工某个零件时，只要从管理程序中找到对应的程序编号即可，而不需要从复杂的程序中去一个一个地寻找需要的程序。

(N126 - 60231，$ POST _ NAME，$ POST _ DATE，$ POST _TIME)，在生成的后置程序中的程序说明部分输出如下说明：

(N126 - 60231，01261，1996，9，2，15：30；30)

c) 程序头　针对特定的数控机床来说，其数控程序开头部分都是相对固定的，包括一些机床信息，如机床回零、工件零点设置、开走丝以及冷却液开启等。

例如：直线插补指令内容为 G01，那么，$ G01 的输出结果为 G01，同样，$ COOL _ ON 的输出结果为 T84，$ PRO _ STOP 为 M02，依次类推。

例：$ COOL _ ON@ $ SPN _ CW@ $ G90 $ $ G92 $ COORD _ x $ COORD _ y@G41H01 在后置文件中的内容为：

T84;

T86;

G90 G92X10.000Y20.00;

G41H01;

d) 跳步　跳步开始及跳步结束指令可以有用户根据机床设定。

② 后置设置　后置设置（参见图 3.3-155）就是针对特定的机床，结合已经设置好的机床配置，对后置输出的数控程序的格式，如程序段号、程序大小、数据格式、编程方式、圆弧控制方式等进行设置。本功能可以设置缺省机床及G代码输出选项。机床名选择以存在的机床名作为缺省机床。

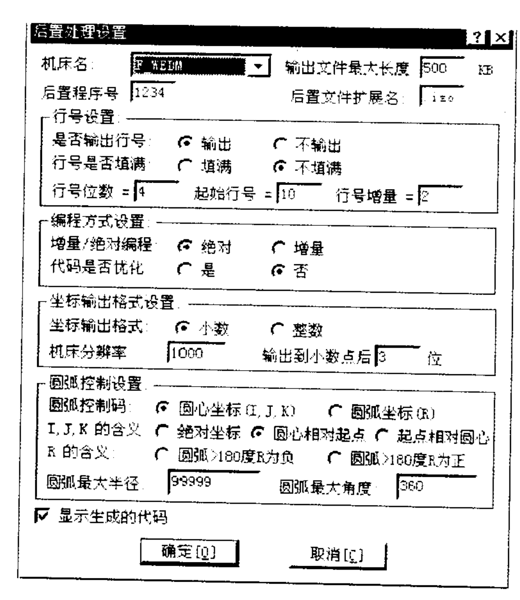


图 3.3-155 后置设置

ⅰ) 功能说明　对后置输出的数控程序的格式进行设置。

ⅱ) 操作说明　选取“后置设置”功能项，则弹出一个需要用户填写的参数对话框。如图 3.3-155 所示。

后置参数设置包括程序段行号、程序大小、数据格式、编程方式、圆弧控制方式等等。在选项中，对应选项被选中后，其前面的小圆圈形框中出现一个小黑点。如果是需要填写具体数值的，用鼠标左键点取该项，然后键盘输入数值。

a) 机床系统　首先，数控程序必须针对特定的数控机床。特定的配置才具有加工的实际意义，所以后置设置必须先调用机床配置。用鼠标点取箭头“↓”就可以很方便地从配置文件中调出机床的相关配置。

b) 文件长度控制　“输出文件长度”可以对数控程序的大小进行控制，文件大小控制以 K 为单位。当输出的代码文件长度大于规定的长度时系统自动分割文件。例如：当输出的 G 代码文件 post.cut 超过规定的长度时，就会自动分割为 post0001.cut，post0002.cut，post0003.cut 等。

c) 行号设置　程序段行号设置包括行号的位数，行号是否输出，行号是否填满，起始行号及行号递增数值等。

是否输出行号：选中行号输出则在数控程序中的每一个程序段前面输出行号，反之亦然。

行号是否填满是指行号不足规定的行号位数时是否用“0”填充。行号填满就是在不足所要求的行号位数的前面补“0”，如 N0028；反之亦然，如 N28。

行号递增数值就是程序段行号之间的间隔。如 N0020 与 N0025 之间的间隔为 5。建议用户选用比较适中的递增数值，这样有利于程序的管理。

d) 编程方式设置　分绝对编程 G90 和相对编程 G91 两种方式。

e) 坐标输出格式设置　决定数控程序中数值的格式：小数输出还是整数输出；机床分辨率就是机床的加工精度，如果机床精度为 0.001 mm，则分辨率设置为 1 000，以此类推；输出小数位数可以控制加工精度，但不能超过机床精度，否则是没有实际意义的。

f) 圆弧控制设置　主要设置控制圆弧的编程方式。即采用圆心编程方式或采用半径编程方式。当采用圆心编程方式时，圆心坐标（I，J，K）有三种含义：

绝对坐标：采用绝对编程方式时，圆心坐标（*I*，*J*，*K*）的坐标值为相对于工件零件绝对坐标系的绝对值。

圆心相对起点：圆心坐标以圆弧起点为参考点取值。

起点相对圆心：圆弧起点坐标以圆心坐标为参考点取值。

按圆心坐标编程时，圆心坐标的各种含义是针对不同的数控机床而言。不同机床之间其圆心坐标编程的含义不同，但对于特定的机床其含义只有其中一种。当采用半径编程方式时，使用半径正负区别的方法来控制圆弧是劣弧还是优弧。圆弧半径 *R* 的含义即表现为以下两种。

优弧：圆弧大于 180°，*R* 为负值。

劣弧：圆弧小于 180°，*R* 为正值。

g）扩展名控制和后置设置编号　后置文件扩展名是控制所生成的数控程序文件名的扩展名。有些机床对数控程序要求有扩展名，有些机床没有这个要求，应视不同的机床而定。后置程序号是记录后置设置的程序号，不同的机床其后置设置不同，所以采用程序号来记录这些设置。以便于用户日后使用。

h）优化代码及显示代码　如果选择优化代码的坐标值，当代码中程序段的某一坐标值与前一程序段的坐标值相等时，不再输出相同的坐标值。否则，所有坐标值都输出。如果选择窗口显示代码，代码生成后马上在窗口中显示代码内容。

③ 生成 G 代码　选取"生成 G 代码"功能项，则弹出一个需要用户输入文件名的对话框，要求用户填写代码程序文件名，此外系统还在信息提示区给出当前所生成的数控程序所适用的数控系统和机床系统信息，表明目前所调用的机床配置和后置设置情况。

输入文件名后点取"确认"键，系统提示拾取加工轨迹。当拾取到加工轨迹后，该加工轨迹变为红色线。操作者可以连续拾取多条加工轨迹，单击鼠标右键结束拾取，系统即生成数控程序。当拾取多个加工轨迹同时生成加工代码时，各轨迹之间按拾取的先后顺序自动实现跳步。与"轨迹生成"模块中的"轨迹跳步"功能相比，用这种方式实现跳步，各轨迹仍保持相互独立，所以个轨迹当中仍可以保存不同的加工参数，比如各个轨迹可以有不同的加工锥度等。

④ 校核 G 代码　校核 G 代码就是把生成 G 代码反读进来恢复生成加工轨迹，以检查 G 代码的正确性。

2）B 代码　B 代码处理功能就是结合特定机床把系统生成的加工轨迹转化成机床代码 B 指令，生成的 B 指令可以直接输入数控机床用于加工，这是本系统的最终目的。考虑到生成程序的通用性，本软件针对不同的机床，可以设置不同的机床参数和特定的数控代码程序格式，同时还可以对生成的机床代码的正确性进行校核。

本节主要介绍线切割加工 B 代码的生成、校核方法及其他相关功能。用户将鼠标指针移动到屏幕右侧的系统模块菜单区中间两排图标上（参见图 3.3-156），当鼠标停留在第二排最右侧的图标上一段时间，则会在相应位置弹出一个亮黄底色的提示条："B 代码"。用左键点取该模块图标后，系统在功能菜单区弹出其子功能的菜单。

生成3B
生成4B/R3B
校核B代码
查看代码
打印代码
传输3B码
同步3B
纸带穿孔
R3B设置

图 3.3-156　子菜单

点取"生成 3B"功能项，则弹出一个需要用户输入文件名的对话框，要求用户填写代码程序文件名。输入文件名后点取"确认"键，系统提示"拾取加工轨迹"。此时还可以设置程序使用的停机码、暂停码和程序格式。当拾取到加工轨迹后，该轨迹变为红色线。用户可以一次拾取多个加工轨迹，单击鼠标右键结束拾取，系统即生成数控程序。当拾取多个加工轨迹同时生成加工代码时，各轨迹之间按拾取的先后顺序自动实现跳步。与"轨迹生成"模块中的"轨迹跳步"功能相比，用这种方式实现跳步，各轨迹仍保持相互独立。

点击菜单其他功能项，执行各种功能，如生成 4B/R3B 代码；校核 B 代码，即把 B 代码文件反读进来恢复线切割加工轨迹以检查代码程序的正确性；可查看 B 代码或其他文本文件及打印代码等。

有关 R3B 的设置见图 3.3-157，它是针对不同机床 R3B 代码存在一些差异而添加的功能，通过对它设置满足一些机床的 R3B 代码。

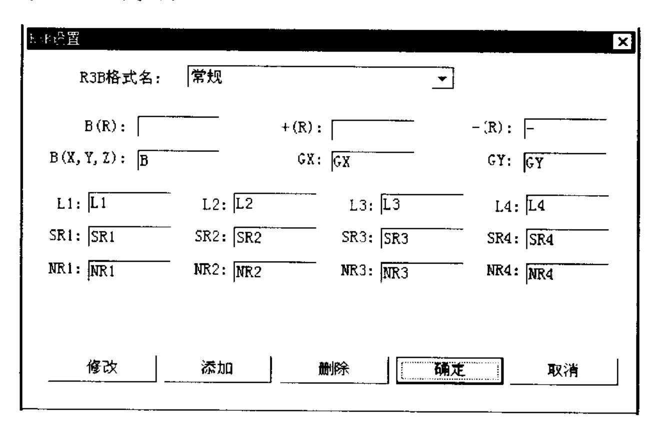


图 3.3-157　R3B 的设置

对话框中列出了 3B 代码的命令，用户根据各自的需要修改相应的命令后，单击"添加（A）"将设置的 R3B 命令添加到序列中。

3）切割编程有两点需注意，一类是通用性较强适用于不同类型线切割机床加工，它是将有关机床所对应的各种参数设定，在编程产生切割指令前，输入到计算机内，系统自动产生相对应的切割指令，一般这类 ISO 指令还包含 G41 左补偿，G42 右补偿，G40 关闭补偿格式和数值；G28 左锥度，G28 右锥度，G27 锥度关闭的格式和角度值。也可以在 4B 或 R3B 代码中写入规定的值，功能接受这种指令代码的机床进行切割加工。但在加工前机床需进行补偿和锥度有关运算，产生二个平面（大小拖板）进行插补运算所需的切割指令方可实行切割加工。另一类切割编程是通过补偿量，锥度参数 *H*、*h*、*α* 等输入，计算机重新计算新的偏移轨迹，生成四轴联动的 ISO 指令，线切割机床可直线取出四轴联动 ISO 代码，直接进行插补运算切割加工，不再进行相关间隙补偿和斜度运算。如 G01 xaybUcVd。

G02 xaybIiJjUcVd，c，d 是线架上端平面内极丝平移和倾斜运动轨迹合成。平移量 $x=a$，$y=b$，倾斜量（小拖板轨迹）：$l_x=c-a$　$l_y=a-b$，见上下异形一节说明。

7.4　自动编程系统的其他功能

绘图式自动编程，不仅能方便将图形形象化输入计算机，并通过计算机进行切割编程产生加工代码，还扩展了不少 CAM 辅助设计功能，大大减轻了人工计算工作量。

（1）非圆曲线的编程



系统将非圆曲线拆分为多段短线，在设定的误差范围内进行拟合，拟合方式如下。

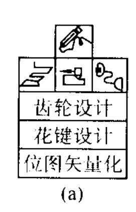
1）直线拟合　系统将非圆曲线分成多条直线段进行拟合。

2）圆弧拟合　系统将非圆曲线分成多条圆弧拟合，一般而言，圆弧拟合方式具有精度高，代码数量少的优点。使用直线和圆弧拟合，图形成为圆和直线构成的图形，对它进行求交点和进行切割编程计算新的轨迹是很方便的。用计算机处理重复繁杂的计算，从而对复杂的非圆曲线等所构成的图形进行加工。

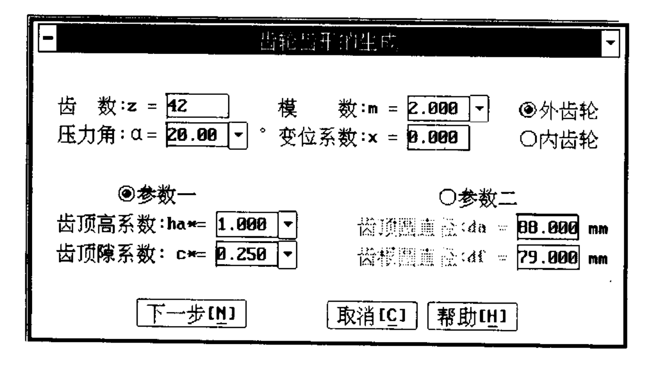
(2) 一些实用功能

1）扩展数据接口　可读入 EXB，DXF，IGES，AUTOP 等格式的文件，便利和其他绘图软件包接轨扩展输入图形格式范围。在自动编程中，这种数据接口的扩展很重要，它能有效利用其他软件包或截取图形设计的部分图案，导出符合条件的后缀名对图形直接进行修改或处理，不再需要重新画图，给用户提供方便实用的功能。

2）齿轮生成　按给定的参数生成整个齿轮或给定个数的齿形。当选取“齿轮设计”功能项后，系统弹出如图 3.3-158 所示的对话框。



(a)



(b)

图 3.3-158　齿轮生成

在对话框中可设置齿轮的齿数、模数、压力角、变位系数等，用户还可以改变齿轮的齿顶高系数和齿顶隙系数来改变齿轮的齿顶圆半径和齿根圆半径，也可以直接指定齿轮的齿顶圆直径和齿根圆直径。

确定完齿轮的参数后，按“下一步”按钮，弹出齿轮预显框，如图 3.3-159 所示。

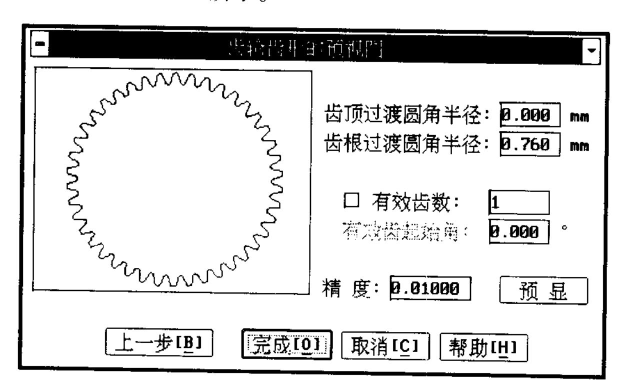


图 3.3-159　齿轮预显框

在此对话框中，用户可设置齿形的齿顶过渡圆角半径和齿根过渡圆角半径及齿形的精度，并可确定要生成的齿数和起始齿相对于齿轮圆心的角度，确定参数后可按“预显”按钮观察生成的齿形。按“完成”按钮结束齿形的生成。如果要修改前面的参数，按“上一步”按钮可回到前一对话框。

结束齿形的生成后，给出齿轮的定位点即可完成该功能。

该功能生成的齿轮要求模数大于 0.1、小于 50，齿数大于 5、小于 1 000。

3）花键　当选取“花键设计”功能项后，系统弹出如图 3.3-160 所示的对话框。在对话框中可设置花键的类型、齿数、模数、压力角等。

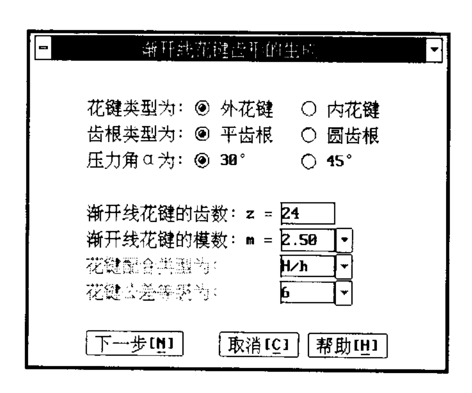


图 3.3-160　花键生成

确定完齿轮的参数后，按“下一步”按钮，弹出花键预显框，如图 3.3-161 所示。

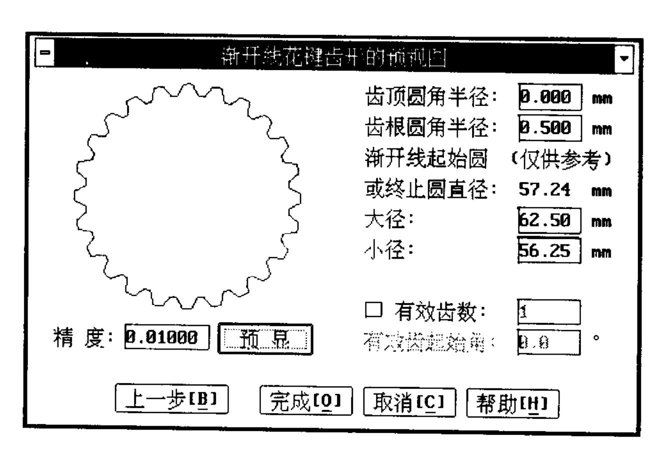
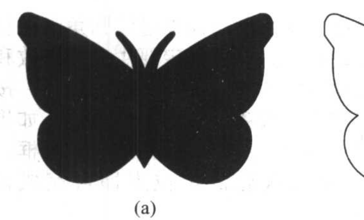


图 3.3-161　花键预显框

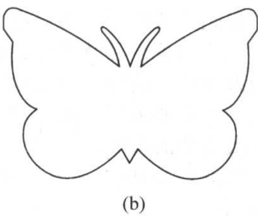
在此对话框中，用户可设置花键的齿顶过渡圆角半径和齿根过渡圆弧半径及齿形的精度等，并可确定要生成的齿数和起始齿相对于花键圆心的角度，确定完参数后可按“预显”按钮观察生成的花键。按“完成”按钮结束花键的生成，如果要修改前面的参数，按“上一步”即可回到前一对话框。

结束花键的生成后，给出花键的定位点即可完成该功能。

4）位图矢量化　图形输入一般都有具体作图参数作依据，也可以通过扫描仪将图像生成 PCX 等图像格式。计算机读入以 PCX 格式存储的图像文件，并进行矢量化，生成可进行加工编程的轮廓图形。扫描图像矢量化可应用于实物、美术画、美术字等各种图案的扫描处理及加工编程。图 3.3-162 所示是位图矢量化的情况。图 3.3-162a 是蝴蝶的位图图像，图 3.3-162b 是矢量化以后的图形。



(a)



(b)

图 3.3-162 位图矢量化

① 矢量化参数说明 矢量化参数有背景选择、拟合方式、像素宽度化、拟合精度和临界灰度值。

a）背景选择 当图像颜色较深而背景颜色较浅，且背景颜色较均匀时，选择“背景为亮色”。当图像颜色较浅而背景颜色较深，且图像颜色较均匀时，选择“背景为暗色”。

b）拟合方式 矢量化处理后生成的边界图形可以用直线或圆弧拟合。若选择“直线拟合”，则整个边界图形由多段直线组成。若选择“圆弧拟合”，则边界图形由圆弧和直线组成。两种拟合方式均能保证拟合精度。圆弧拟合的优点在于生成的图形比较光滑，线段少，由此生成的加工代码也较少。

c）像素宽度比例 像素宽度比例表示每个像素点的尺寸大小，单位为毫米（mm）。它的作用是调整位图矢量化后图形的大小。若希望矢量化后的图形的大小与原图相同，则需要根据扫描图像时设置的分辨率来计算像素点的尺寸大小。在用扫描仪对图像或实物进行扫描时，需设置扫描精度，单位为 DPI，即每英寸长度内像素点的位置。例如：200（DPI）表示每英寸范围内 200 个像素点。每英寸范围内的像素点数越多，扫描精度越高，每个像素点的尺寸越小，图像越精密。若扫描分辨率为 300（DPI），则每个像素点的大小为 1/300（英寸），换算成以毫米为单位，则每个点的大小为 25.4/300 = 0.085（mm）。此时，在“像素宽度比例”中填入参数 0.085，则矢量化处理后的图形与原图像大小相同。

d）拟合精度 拟合精度值越小，拟合精度越高，轮廓形状越精细，但有可能出现较多的锯齿。适当降低拟合精度，可以消除锯齿。精度过低会使轮廓形状出现较大偏差。拟合精度取值范围 1～2 为宜。

e）临界灰度值 灰度即像素点的亮度。灰度值的最大范围是 0～255。当图像颜色为纯黑色，灰度值为 0；当图像颜色为纯白色，灰度值为 255；其他颜色的灰度值介于 0 到 255 之间。软件以“临界灰度值”为标准，描绘灰度值大于它和小于它区域的边界。软件在读入 PCX 图像文件时，自动以背景的灰度值为“临界灰度值”。点击“临界灰度”菜单，其下括号中出现的范围就是软件算出的图像灰度范围，也可以自行定义临界灰度数值。

② 操作说明

a）选择“位图矢量化”命令，屏幕上出现“选择 PCX 文件”对话框，用户在此选择矢量化文件。

b）选择完 PCX 图像文件后，按上述的参数说明设定和修改立即菜单中的参数。

c）鼠标右键确认，即可完成位图矢量化。

还需注意以下一些问题。

a）软件处理 16 位以下的 PCX 图像文件。用户若有其他图像文件，如 JPG、BMP 等图像文件请转换成 PCX 图像文件。

b）PCX 图像文件最好为黑白两色图像。

c）PCX 图像应该是由边界及其内部区域组成的图像。

d）若需要将图形放大或缩小，可在“几何变换”菜单中选取“放缩”功能，在屏幕的右下角的立即菜单中输入所需的比例值，即可实现图形的放缩。

e）一般情况下，扫描分辨率 300DPI 就够用了。若用户有特殊要求，扫描分辨率可适当增加。

5）拐角处理 在线切割加工中还会遇到拐角处如何进行过渡的问题，在轮廓中相邻两直线或圆弧（取切点同向）呈大于 180°的夹角时（即是凹的），需确定在其间进行“圆弧过渡”或“尖角过渡”，其含义如图 3.3-163 所示。系统缺省取“圆弧过渡”方式。两者的加工效果是一样的，所不同的是加工轨迹，“尖角过渡”的削路径长度大于“圆弧过渡”的路径长度。

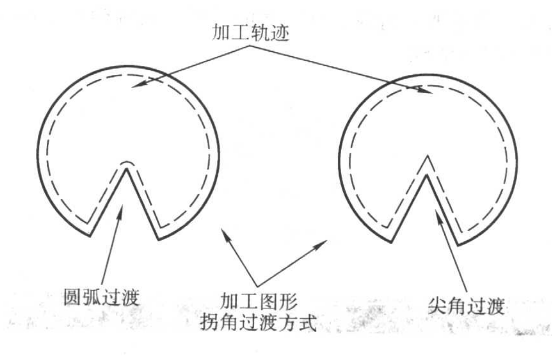
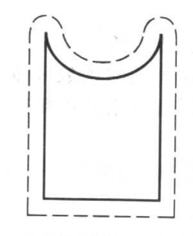


图 3.3-163 拐角处理

6）补偿处理时会产生如下图形分离情况 在对图形进行补偿时，当遇到如图 3.3-164 所示的直线与圆弧或圆弧与圆弧相交（切）时，由于补偿量的存在会导致图形相离，从而产生图形的不封闭出错，使补偿无法进行。

为解决这一问题，可在补偿后即已产生相离的结点处加一过渡圆，对已相离的两线段进行连接。该过渡圆的圆心为原两线段的交（切）点，半径则为所加的补偿量，这样一来，由于一般补偿量都比较小，故所加过渡圆对原图形的尺寸影响较小，也解决了相离导致的不可补偿问题。



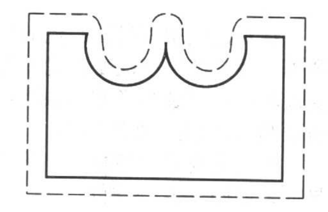


图 3.3-164 补偿处理时产生的图形分离

7）切割面积计算 系统根据加工轨迹和切割工件厚度，自动计算实际的切割面积，只需依照提示进行操作即可。

编写：洪福民（上海大量电子设备有限公司）
齐从谦（同济大学）

第 4 章　电火花线切割加工的基本规律

1　电火花线切割加工的工艺指标及测试方法

1.1　主要工艺指标

为了评价电火花线切割加工的工艺效果，若不考虑其他因素，简单说来可直接测量被加工工件，并以其测量数据来表示，即加工精度和表面粗糙度。但事实上从加工机理上看，电火花线切割加工是一个比一般的金属切削加工要复杂得多的兼具物理和电化学性质的加工过程，电火花线切割加工的本质是对工件实施放电蚀除，从而达到加工成形的目的。这种加工特性决定了其加工工艺效果必然具有某些综合性和复杂性。放电是一个物理概念，是放电加工的关键所在，放电加工就是利用电极和工件间放电产生的局部高温使被加工的金属件熔化，进而在其他条件的配合下加以蚀除。而蚀除过程也是一个相当复杂、且在诸多相关条件的共同作用下所发生的结果。既然放电加工能使被加工件产生熔化蚀除，那作为加工一极的电极丝肯定也有同样的结果，只不过由于在加工过程中所处的极性不同导致了被加工件的蚀除量要远大于电极丝的蚀除量，它随着放电状态的变化、相关条件（电介质的性能）的变化而变化，因此，不能简单地套用一般的金属切削加工的评价方法来评价线切割加工的工艺效果，而是应当着重考虑加工设备本身的性能指标。加工的工艺效果，即加工精度、表面粗糙度等实际上是由设备本身的性能所决定，操作者的作用只不过是最大限度地发挥设备的性能而已。正因为如此，我们除了用加工精度及表面粗糙度等工艺指标外，还引入了加工速度、最大切割厚度等指标来衡量线切割加工的工艺效果。对于往返运丝的高速走丝电火花线切割加工来说，还引入了电极损耗这项工艺指标。由于影响电火花线切割加工工艺效果的因素很多，而且还是相互制约的，真正反映电火花线切割加工工艺水平的是它的综合指标，但在实际使用过程中，由于应用领域的不同，可能对某些指标特别关注，所以应合理考虑其单项工艺指标。

1）切割速度　切割速度（或称加工速度）是指在一定的加工条件下，单位时间内电极丝中心线在工件上扫过的面积总和：

$$V_s = S/t \tag{3.4-1}$$

式中，V_s 为切割速度，mm^2/min；S 为电极丝中心线在工件上扫过的面积总和，mm^2；t 为切割时间，min。

切割速度的快慢，主要由施加于电极间的高频电源能量所决定，电介质的性能状况及其他工艺参数对切割速度也有不同程度的影响。

2）加工精度　电火花线切割加工精度是指切割后的工件，其实测尺寸相对于所要求的理论尺寸的偏差；它还包括几何形状偏差（如直线度、平面度、圆度、圆柱度、线轮廓度）和位置偏差（如平行度、垂直度、倾斜度、位置度等）。影响加工精度的因素很多，除了高频电源参数和电介质的性能外，更多的取决于机械本身的运动精度及运丝系统的平稳度。

3）加工表面粗糙度　电火花线切割加工后的工件表面是由无数个放电凹坑组成的，通常无光泽，其微观几何形状特征通常用轮廓算术平均偏差 R_a 来评定，即在取样长度为 L 的范围内，轮廓高低偏距绝对值的算术平均值，以微米为单位。

$$R_a = \frac{1}{l}\int_0^l |y(x)|\,dx \text{ 或近似为 } R_a = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} |yi| \tag{3.4-2}$$

国外有些制造商习惯用微观最大不平度 R_{max} 来评定电火花线切割加工表面粗糙度，R_{max} 为在取样长度内，轮廓峰顶与轮廓谷底线之间距离，相当于我国的轮廓最大高度 R_y，在电火花线切割范围内 R_{max} 值约为 R_a 的 5 倍。撇开机械走丝系统平稳性的因素的影响，加工表面粗糙度主要取决于高频电源的脉冲参数，在稳定加工的范围内，峰值电流一定时，脉宽越窄，越能获得较高的表面粗糙度。

4）电极丝的损耗　对于往返运丝的高速走丝电火花线切割，用一定长度和直径的电极丝切割一定面积（例如：10 000 mm^2 或 50 000 mm^2）后电极丝直径的减小量称为电极的损耗。一般来讲，在加工过程中，电极的损耗是不可避免的，我们所追求的是如何减少此类损耗，因电极丝的损耗直接影响到加工的精度。电极的损耗大小主要取决于脉冲的波形状态，较小的脉宽可能引起较大的电极损耗，脉冲波形上升沿的形状也是影响电极损耗的关键因素。对于单向低速走丝的电火花线切割来说，因电极丝是一次性使用，一般不考虑其电极的损耗。但即使损耗可以忽略不计，事实上还是有损耗，所以高精度的低速走丝线切割机也有在编制切割程序时，软件自动生成一补偿量，来纠正由于丝的损耗引起的加工面上下截面的尺寸误差。

5）切割厚度　切割厚度是指电火花线切割机能进行稳定切割加工的工件最大厚度，以毫米为单位。切割厚度的大小主要取决于放电间隙的排屑条件，增大放电间隙或提高走丝速度都有助于提高切割厚工件的能力。

1.2　常用的测试方法

电火花线切割加工需要测试的参数很多，各生产厂商大多自成体系，但应符合机械行业或国家标准的基本要求。下面我们主要介绍一下常用的评价电火花线切割工艺效果的有关参数及其测试方法。

（1）切割速度

由于工艺条件和要求不一样，具体测试时将会遇到要求测试平均切割速度、瞬时切割速度、最大切割速度以及某种特定条件下的切割速度等不同情况。

1）平均切割速度　是指按 GB/T 7925—1987 国家标准规定，在所选的工艺条件下，切割厚度 h 为 40 mm 的工件，切割长度 l 为 30 mm，并用记时表记录从切割开始至结束的时间 t，平均切割速度（mm^2/min）通过以下计算获得：

$$V_s = \frac{s}{t} = \frac{h \times l}{t} = \frac{40 \times 30}{t} \tag{3.4-3}$$

2）瞬时切割速度　在高速走丝情况下，储丝筒二次换向间隔内的平均切割速度，它不计储丝筒换向时切断脉冲电源的时间，也不规定测试时切割长度必须大于多少，仅表明实际加工时的切割速度，测试方法如下。

① 首先用计时表记录储丝筒每次换向间隔间的实际加工时间 t_{on}(s)，不包括换向时间，同时记录在此时间内沿坐标轴方向切割的长度 L（mm），通常可从 X（或 Y）坐标数值显示中读出。

② 如果测试时被切割工件的厚度为 h（mm），则瞬时切割速度 V_{si}（mm^2/min）为：

$$V_{si} \approx \frac{60 \times h \times l}{t_{on}}$$

3）最大切割速度　是指在不计加工表面粗糙度的情况下，能进行稳定切割的最大平均切割速度。测试时所选用的电规准一般较大，工件厚度 h 为 40 mm，在切割稳定后记录切割长度 $l = 30$ mm 时所耗费的时间，即可获得该机的最大切割速度（mm^2/min）。

$$V_{smax} = \frac{h \times l}{t}$$

4）在某种约束条件下的切割速度　由于切割速度与加工表面粗糙度是一对矛盾，人们认为评价机床的性能，应要求在同样的约束条件下进行，所指的约束条件一般是指在同样的加工表面质量（如 $R_a \leqslant 2.5$ μm 或 $R_a \leqslant 1.5$ μm）的情况下的切割速度，还可以规定实测时的切割方向。

（2）加工精度

根据 GB/T 7926 国家标准，电火花线切割加工精度应该检验试件在纵剖面上的尺寸误差、横剖面尺寸误差、被加工孔的坐标精度以及被加工孔的一致性，如表 3.4-1 所示。还有圆柱体圆锥体的圆度及小圆角检验等。

表 3.4-1　电火花线切割加工精度检验内容

序号	简图	检验项目	允差 /mm
p1	40 28	纵剖面上的尺寸差	0.012
p2	40 28	横剖面上的尺寸差	0.015
p3	X_1　A　B　C　D　y_1　y_2　50　150.63　X_2　100　200 1）试件切割厚度须大于或等于 5 mm 2）最小正方孔边长须大于或等于 10 mm 3）每次方孔的扩大余量须大于或等于 1 mm（允许含有 $R=3$ 的圆角） 4）正方孔也可以用相应圆孔代替	加工孔的坐标精度	0.015
p4	Y X	加工孔的一致性	0.03

续表 3.4-1

序号	简图	检验项目	允差 /mm
p5	$\phi20\pm0.02$　1.5°　40	锥体的圆度	0.02

1）纵剖面上的尺寸误差　用千分尺测量试件两个平行加工表面间的尺寸，在中间及各离端面的 5 mm 处进行测量，求出最大尺寸与最小尺寸之差值。

2）横剖面的尺寸误差　用千分尺测量在同一横剖面上各个加工表面对边之间尺寸，取最大差值。这一测量应在中间及离端面 5 mm 处分别进行三次检测，其最大值为其误差值。

3）加工孔的坐标精度　将 200 mm × 100 mm × 5 mm 的试件安装在工作台上，并使其基准面与工作台运动方向平行，然后以 A、B、C、D 为中心切割四个 10 mm × 10 mm 的正方孔。试件加工完毕之后，再用千分尺检测各孔沿坐标轴方向的中心距，并分别与设定值相比较，以差值最大值为误差值。

4）加工孔的一致性　利用上述的坐标精度的试件，测量四孔在 X，Y 方向上的尺寸，其最大差值为误差值。

5）圆柱锥体的圆度　在 40 mm 厚的试件上切割一个带 1.5°单面斜度的 $\phi20$ mm 圆柱锥体，用千分尺均匀多点（不少于 6 点）测量大端面直径，其测量中的最大值和最小值之差为圆度误差。如果希望用千分尺检验圆柱锥体二端大圆和小圆的圆度，可在试件上小端叠一块 3～5 mm 的薄板，连同试件一起加工，则薄板切割下来的大圆端在锥度不大的情况下可视为与试件小端尺寸一致，则检验薄板切割下来的大圆尺寸即可得到试件小端的圆度。

6）拐角小圆半径 R　通常可用投影仪检测拐角处的小圆 R。

（3）加工表面粗糙度

从微观上看，电火花线切割加工的表面是不平的。为了真实地评定加工表面所形成的微观几何形状误差。我们在检测加工表面粗糙度时应该在被测表面选择具有代表性的若干部位分别进行检测，并正确选择取样长度和评定长度（$R_a >$ 0.02～0.1 μm 时，取样长度为 $l_2 = 0.25$ mm，评定长度 $L =$ 1.25 mm；$R_a >$ 0.1～2.0 μm 时，取 $l_2 = 0.8$ mm　$L = 4.0$ mm；$R_a >$ 2.0～10.0 μm 时，取 $l_2 = 2.5$ mm，$L = 12.5$ mm）。

表面粗糙度的测量方法一般有以下 5 种。

1）轮廓仪触针法　使用电子仪器的传感器，将工件表面微小不平的峰、谷值转换为电平信号的变量，并通过仪表显示或记录，根据所测得的量值确定粗糙度 R_a 值。用这类测量方法的仪器有各种轮廓仪。

2）比较法　将被测零件与表面粗糙度样板相比较进行检测。通常用目测或手感，也可二者结合进行。

3）光切法　通常使用双管显微镜即利用光切原理测量各种加工表面的粗糙度法。

4）干涉法　利用干涉原理和显微镜系统来测量工件表面粗糙度值。

5）印模法　是间接测量表面粗糙度的一种方法。这种方法适用于测量仪器不能直接测量的工件表面。它是用适于复制的材料将被检测表面轮廓形状复制出负模，然后通过测量复制品的表面粗糙度来确定工件表面粗糙度。

在电火花线切割加工生产实践中，如要求准确地测定加工表面粗糙度值，一般还是采用轮廓仪触针法。按 GB/T

7926 国家标准规定，在厚度为 40 mm 的材料上切割出 12 mm × 12 mm 的试件，然后用轮廓仪测量加工表面的中间及离端面 5 mm 处的 R_a 值，取其平均值。四个加工表面分别测量后，以其中 R_a 的最大值为其粗糙度值。为考虑电极丝的加工影响，一般要求测量方向与走丝方向垂直。如要求不高，也可用比较法，但比较样板最好也是由电火花线切割加工而成，其表面状态尽可能与被测表面相同或相近，以便目测比较。

(4) 电极丝的损耗

电极丝损耗是指电极丝在切割工件一定面积后的电极丝直径的变化量。该项指标在 GB/T 7926 国家标准中未作明确规定，但为了保证加工尺寸精度，常以 200 m 长的电极丝在切割 10 000mm² 面积的工件后电极丝直径损耗量为评价标准，目前认为小于 0.005 mm 就属于较佳水平了。也有以 200 m长的电极丝在切割 50 000 mm² 后电极丝直径损耗量作评价标准的。电极丝的丝径测量常用千分尺，在电极丝横断面的垂直两个方向测出其直径大小，取其平均值。加工 10 000 mm² 后，再在 200 m 长的电极丝中段和离两端约 20 m 处分别测量 3 次，取其直径平均值与未加工前的直径比较，所得差值即为电极丝的直径损耗。由于电极丝在未加工前其外表是平滑的，在刚切割时，由于损耗几乎可以忽略不计，但由于放电的缘故，加工后变得粗糙，电极丝外表的平滑度已遭轰击破坏，变得高低不平，这时用千分表测量其直径时实际上是电极丝外表微观凸起部分的数值，所测定的数值可能会大于平滑状态的丝径（约有几个微米），但随着加工过程中电极丝损耗加大的影响，电极丝的测量数值在增大后又会逐渐减小。

(5) 大厚度切割

大厚度切割也是评价电火花线切割机工艺水平的一个内容。具备大厚度切割能力的电火花线切割机，一般应能在切割厚度为 200 mm，直径 ϕ10 mm 零件的整个过程中，保证平均切割速度大于 40 mm²/min 且连续切割不断丝即可认为达到 GB/T 9726 国家标准规定。

有些机床厂商突出自己的大厚度切割特点，规定了最大切割厚度为 400 mm、500 mm、甚至 1 000 mm，在检验时也应该在规定的最大切割厚度工件上，切割大于 ϕ10 mm 的试件而保证整个切割过程中平均切割速度大于一定值，并应做到连续加工不断丝。

1.3　各工艺指标之间的关系

电火花线切割加工的各项工艺指标并非是独立的，而是相互联系和相互影响的。例如，增加单个脉冲放电能量会增大每次脉冲放电的放电凹坑大小，使加工表面变得更加粗糙，但增大放电能量又会增大电火花线切割加工的切割速度；又如，增大脉冲峰值电流会增大电极丝的损耗并使放电间隙增大，二者都会使加工精度降低。我们在电火花线切割加工过程中，不能单一追求某项工艺指标，而只能根据加工要求合理选择搭配各种工艺参数以达到综合的工艺效果。

在实际加工时，影响各项工艺指标的因素很多，我们应该在了解其规律的基础上，根据不同情况分别对待，灵活处理。各项工艺指标与加工条件之间的相互依存关系如图 3.4-1 所示。

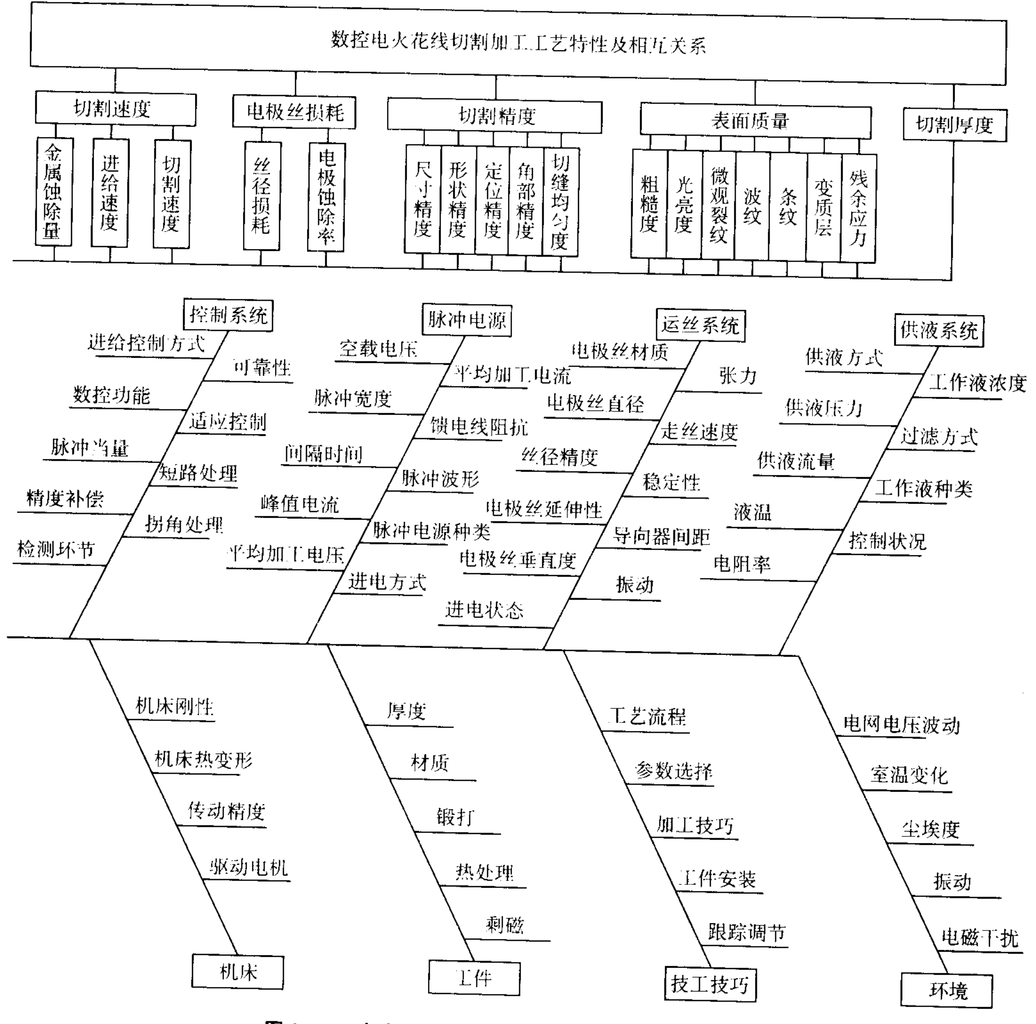


图 3.4-1　电火花线切割加工工艺指标及相互依存关系



从图中不难看出，线切割工艺是比较复杂的，要了解和掌握其工艺规律有一定困难。我们应该分析了解其主要矛盾及主要因素，图3.4-2所示说明了各加工条件对各工艺指标的主要影响关系。

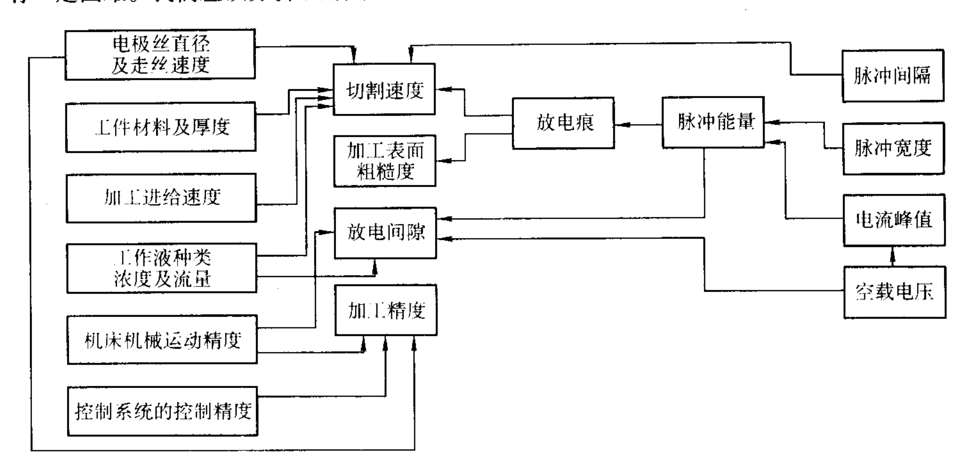


图3.4-2　诸因素对工艺指标的影响

2　影响切割速度的主要因素

电火花线切割加工与电火花成形加工一样，都是基于脉冲放电时的电腐蚀原理，即每次脉冲放电都会在工件表面形成一个高温热源而使一定的工件材料被蚀除，并在工件表面留下一个微小的放电凹坑。而且，脉冲放电能量 W 愈大，传递给工件上的热量就愈多，被蚀除的材料也愈多，并近似于正比例关系。设在一个脉冲当量的作用下蚀除的材料体积为 V_i，则有

$$V_i = kw \tag{3.4-4}$$

根据叠加原理，1 min 重复脉冲放电的蚀除量（即加工速度，或称蚀除率）V 为：

$$V = \sum V_i = 60fkw\lambda \tag{3.4-5}$$

式中，V 为加工速度，即 1 min 内工件材料的蚀除量，mm^3/min；V_i 为一个脉冲放电时工件材料的蚀除量，mm^3；f 为重复脉冲放电频率，s^{-1}；k 为系数，与电极丝材料、工件材料、脉冲参数、工作液以及排屑条件等有关；w 为单个脉冲放电能量，J；λ 为有效脉冲利用率。

单个脉冲放电所释放的能量 w 取决于极间电压 $u(t)$、放电电流及脉冲放电持续时间 t_{on}，即：

$$W = \int_0^{t_{on}} u(t)i(t)\mathrm{d}(t) \tag{3.4-6}$$

实际上，击穿后的极间火花维持电压 U_t 是一个与电极对材料及工作液种类有关的数值（如在煤油中用铜丝加工钢时约为 25 V，而在乳化液中用铜丝加工钢时则为 20 V 左右），而与脉冲电压幅值、放电电流大小关系不大，如图3.4-3所示。

在实际加工过程中电火花线切割加工的切割速度 V_s 和上述描述的加工速度 V（蚀除率）略有不同，在相同的脉冲能量下，由于电极丝的直径不同导致加工速度有所差异，二者之间大致相差一个切缝宽度 b：

$$V_s = V/b = 60fkw\lambda(d+2\delta) \tag{3.4-7}$$

式中，V_s 为切割速度，mm^2/min；V 为加工速度（蚀除率），mm^3/min；b 为切割缝宽度，mm；d 为电极的直径，mm；δ 为单向放电间隙，mm；w 为单个脉冲放电能量，J；k 为系数，与电极对材料、脉冲参数、工作液以及排屑条件等有关的系数；λ 为有效脉冲利用率。

由此可知，影响电火花线切割加工切割速度的因素很多，包括脉冲参数、电极丝的直径以及与系数 k 相关的众多因素，如图3.4-4所示，下面将有重点地分别加以论述。

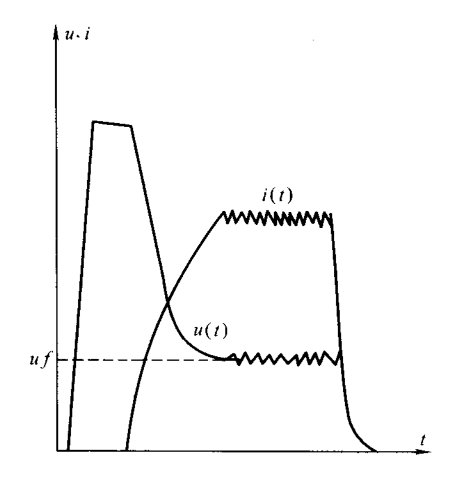


图3.4-3　极间放电电压与电流

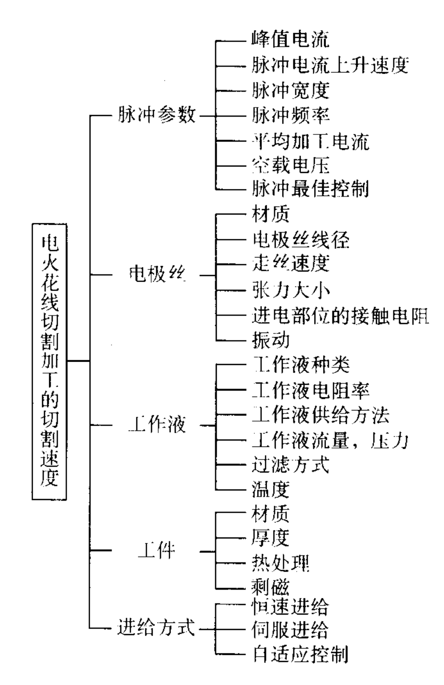


图3.4-4　影响电火花线切割加工切割速度的因素

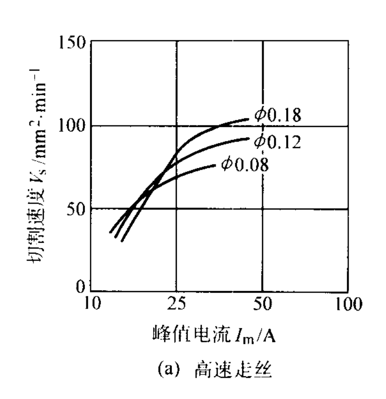


2.1　脉冲参数对切割速度的影响

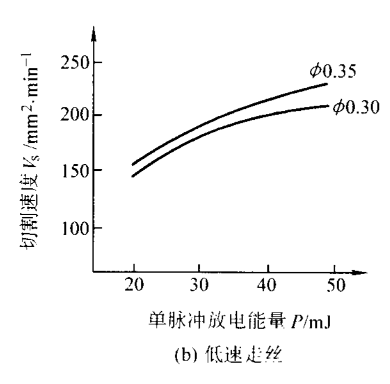
1）峰值电流 I_m 的影响　在其他条件保持不变的情况下，提高脉冲峰值电流 I_m 可以按比例提高单个脉冲放电能量，因而可以按比例提高切割速度。

从图 3.4-5a 中不难看出：①在高速走丝的情况下，切割速度在一定范围内随脉冲峰值电流的增大而增大；②当峰值电流增大到一定程度时，由于加工电流增大，电蚀产物浓度增加，会影响加工稳定性而使切割速度增大速度减慢，甚至会导致切割速度因峰值电流继续增大而下降。电极丝直径愈细，这种现象出现得愈早；③较粗的电极丝在较大的峰值电流情况下仍可稳定加工，不仅是因为电极丝横截面积大，能承受较大的峰值电流，而且还因为用粗电极丝加工时切缝较宽，有助于电蚀产物的排出。正因如此，在加工过程中可以体会到在峰值电流小而排屑条件良好的情况下，细电极丝的切割速度会比粗电极丝高一些。

图 3.4-5b 所示的低速走丝情况，在一定的范围内，切割速度几乎与单脉冲能量（峰值电流）成比例增加，但若峰值电流过大加上冲液状况不良而影响其切缝排屑，切割速度就会减慢，并有可能引起断丝。一般来讲，慢速运丝线切割机的切缝排屑主要靠高压冲洗强制排屑，切缝宽一点有利于高压水流进入，排屑效果好。图中粗丝在相同条件下切割速度高一点，主要是因为低速走丝排屑条件差，粗丝加工时切缝较宽有助于排屑。



(a) 高速走丝



(b) 低速走丝

图 3.4-5　峰值电流与切割速度

2）脉宽 t_{on} 对切割速度影响　在其他条件保持不变的情况下，切割速度将随着脉冲宽度 t_{on} 的增加而增加。如图 3.4-6 所示。但当脉宽增大到一定范围时，切割速度将明显偏离其正比关系，甚至还会随脉宽的增加反而下降。出现这种情况的原因主要是由于脉宽增加时，蚀除量增加，排屑条件变差，使加工变得不稳定而影响切割速度。另外。脉冲宽度过大还有可能使正常的脉冲放电状态转变为瞬间电弧放电状态，烧坏工件或造成断丝。由于低速走丝时排屑条件较差，一般都不采用增加脉宽的方法来提高切割速度，而是以窄脉冲高峰值电流方式来提高切割速度。高峰值电流有助于增大放电爆炸力，扩大放电间隙，以改善排屑条件。目前，低速走丝线切割所用的脉宽都在 10 μs 以下，有的采用亚微秒级脉宽，最小可小至 50 ns 左右。而最大峰值电流 I_m 可达 1 000 A。此外，在低峰值电流情况下，脉冲宽度过大也会导致热量向工件内部传散的比重增大，不仅会影响切割速度，而且还会影响加工表面热影响层厚度。

3）脉冲间隔 t_{off} 对切割速度的影响　在其他加工条件保持不变的情况下，减小脉冲间隔 t_{off} 会使脉冲放电频率增加，从而使切割速度随之提高，如图 3.4-7 所示。实验结果表明，当脉冲间隔 t_{off} 远远大于脉宽 t_{on} 时，脉冲间隔的减小会使切割速度成比例地增大；当 t_{off} 减到可以与脉宽 t_{on} 比拟时，这种反比例关系将会明显偏离，加上脉冲间隔 t_{off} 过小会使切割中的电蚀产物浓度剧增而使加工变得不稳定，严重影响切割速度的提高，甚至因脉冲间隔过小而产生电弧放电使电极丝烧断，致使线切割加工无法继续进行。脉冲间隔 t_{off} 的合理选取，与其他脉冲参数、走丝速度、电极丝直径、工件材料及厚度等多种因素有关，应视不同条件而异。在高速走丝的条件下，因其脉冲峰值电流一般都在 20 A 以下，一般认为脉冲间隔 t_{off} 为脉冲宽度 t_{on} 的 3～5 倍为佳。如果工件厚，排屑条件恶劣时，可以适当增加脉冲间隔，降低加工电流和切割速度，提高切割的稳定性。

增大脉冲间隔故然可以防止断丝，但并非“脉冲间隔越大，加工越稳定”。因为脉冲间隔越大，在现有的检测条件下，会给进给控制系统的检测取样造成困难，降低了跟踪的灵敏性，反而不易保证加工的稳定性。高速走丝电火花线切割机在脉冲峰值电流较低（$I_m \leqslant 20$ A）的情况下，脉冲宽度与脉冲间隔的比值可参照表 3.4-2。如果脉冲峰值电流较大，

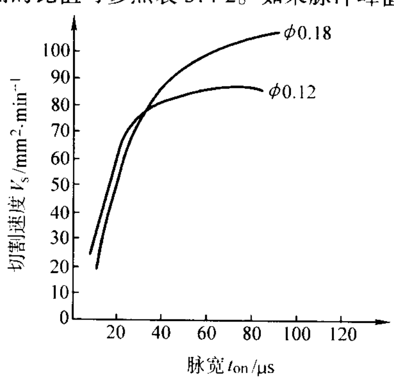


图 3.4-6　脉冲宽度与切割速度的关系

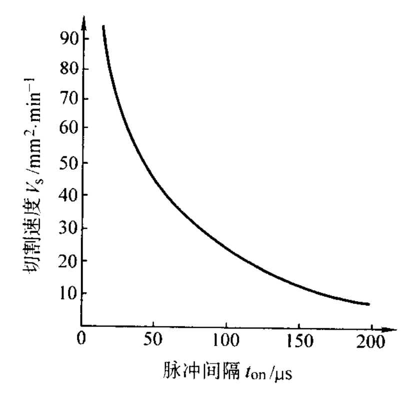


图 3.4-7　脉冲间隔与切割速度的关系

则脉冲宽度与脉冲间隔之比也应相应增大。改变脉冲间隔大小可以明显改变切割速度，而单个脉冲的放电能量及加工表面粗糙度基本不变。这一特征在实现自动控制中经常被利用，即把脉冲间隔 t_{off} 作为自动控制中的主要控制参数。

表 3.4-2　脉冲宽度与脉冲间隔的选择

电源波形	方波			分组脉冲			高低压分组脉冲		
材料 \ 厚度	普通厚度	大厚度	超厚度	普通厚度	大厚度	超厚度	普通厚度	大厚度	超厚度
Cr12	1:3	1:5	1:7	1:3	1:4	1:6	1:3	1:4	1:5
Cr12MoV CrWMn	1:4	1:6	1:8	1:4	1:5	1:7	1:4	1:5	1:6
H62	1:2	1:4	1:5	1:2	1:3	1:5	1:2	1:4	1:5
紫铜	1:3	1:5	1:7	1:3	1:4	1:7	1:3	1:4	1:6
硬质合金	1:5	1:6	1:7	1:4	1:5	1:8	1:4	1:5	1:6
铸铁	1:5	1:6	1:7	1:4	1:6	1:9	1:4	1:5	1:6
不锈钢	1:4	1:6	1:8	1:4	1:6	1:8	1:4	1:5	1:7
电工纯铁	1:4	1:6	1:8	1:4	1:5	1:7	1:4	1:5	1:6
硅钢片	1:5	1:7	1:9	1:5	1:6	1:9	1:4	1:5	1:6

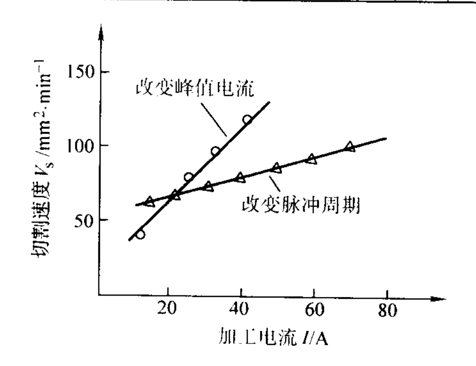


图 3.4-8　加工电流对切割速度的影响

尽管如此，在稳定加工条件下，加工电流相同时切割速度的差异是不大的（图 3.4-8）。因此，切割速度与加工电流的关系可以用下式来估算：

$$V_s = KI \tag{3.4-8}$$

式中，V_s 为切割速度，mm^2/min；I 为加工电流，A；K 为系数，$mm^2/(min\cdot A)$。

系数 K 的大小随加工条件而异：切割硬质合金等难于加工的材料，或者要求加工表面粗糙度 $R_a < 0.63$ mm 时，K 取 5 ~ 10；如果电极丝移动速度低或要求 $R_a < 1.25$ mm 时，K 取 10 ~ 15；如果电极丝移动速度高，且对加工表面粗糙度没有特殊要求，K 取 20 ~ 25。在电火花线切割加工过程中，只要加工条件一定，选用一定的加工电流进行加工，则它的切割速度也是一定的，所以说，一个零件用电火花线切割加工最容易估算其加工工时。

4）开路电压 U 对切割速度的影响　开路电压也就是脉冲电源的空载电压，它与切割速度的关系如图 3.4-9 所示。在正常情况下，开路电压的升高会使切割速度显著提高，这是因为脉冲电源的内阻是不变的。脉冲电源的空载电压升高必然会使脉冲峰值电流和平均加工电流提高。但是，切割速度提高到一定程度的时候，加工区内的电蚀产物会越来越多而使切缝排屑条件逐渐恶化，影响切割速度的提高，这时，我们可以采用加大丝径的方法来扩大切缝，从而改善排屑条件，如图 3.4-9 曲线上端所示。而开路电压过低，则会因放电间隙过小而无法稳定加工。开路电压对切割速度的影响，不仅仅是通过改变脉冲峰值电流来起作用的，而且还会改变放电间隙大小来影响加工的稳定性。

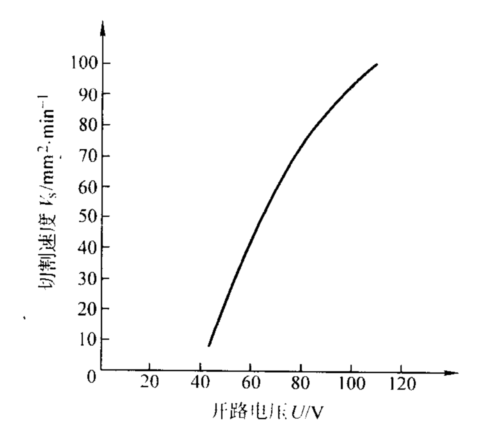


图 3.4-9　开路电压 U 对切割速度的影响曲线

根据介质击穿理论所推道出的单面放电间隙经验公式：

$$\delta = k_n u_m - k_t t^{-n} + k_R w^{0.4} + A_m \tag{3.4-9}$$

$$K_t = C/E_{KP}$$

式中，δ 为单面放电间隙，mm；u_m 为脉冲电压幅值，V；k_n 为常数，mm/V，$k_n = E_{KP}^{-1}$；E_{KP} 为工作液的临界介电强度，V/mm；k_t 为系数，mm·s；C 为系数，V·s，与工作液介质有关；t 为脉冲持续时间，即脉宽，s；n 为系数，与工作液介质有关；k_R 为系数，与电极对材料有关；w 为单个脉冲放电能量，J；A_m 为机械因素引起的放电间隙扩大量，mm。

从式（3.4-9）中可以看出，如果不考虑材质、工作液介质等因素，开路电压与放电间隙是正比例关系，提高开路电压有助于增大放电间隙，从而改善排屑条件，有助于切割速度的提高。图 3.4-10 是通过改变脉冲电源内阻来维持脉冲峰值电流不变的情况下，开路电压对切割速度的影响曲线。此关系曲线可以说明以下几点：①开路电压过低（如小于 50 V），会因放电间隙太小而难于保持加工稳定；②随着开路电压的提高，切割速度会相应提高；③开路电压增加到一定数值时，切割速度几乎不再增加。在高速走丝时用乳化油作工作液，最高开路电压不宜超过 150 V，而低速走丝时用去离子水作工作液，并采用高压喷射强行排除放电产物，故开路电压可以提高到 350 V 左右。

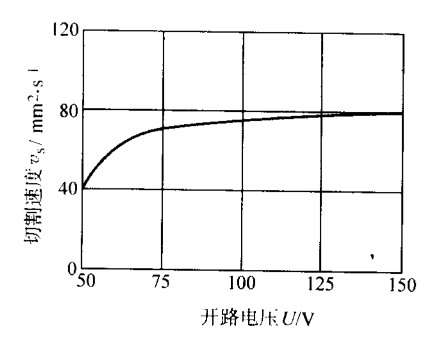


图 3.4-10　在加工电流不变的条件下电压对切割速度的影响

2.2　非电参数对切割速度的影响

（1）电极丝及其移动速度对切割速度影响

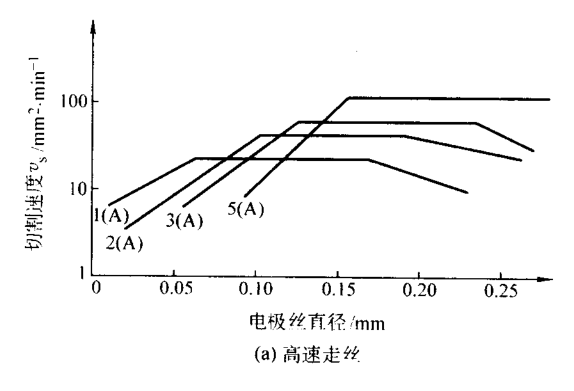
1）电极丝直径　电火花线切割加工时所用的电极丝直径，通常在 0.03 ~ 0.35 mm 范围内。由于不同的材料有不同的抗拉强度，所以由不同材料所制成的电极丝其允许的直径范围也有所不同：黄铜丝一般为 0.10 ~ 0.35 mm，钼丝为

0.06～0.25 mm，而钨钼丝为 0.03～0.25 mm，电极丝的粗细直接影响到切割速度。由式（3.4-7）可知，在排屑条件良好的情况下，增大电极丝直径会使切缝宽度 b 增大而导致切割速度 v_s（$v_s = v/b$）下降，见表 3.4-3。但由于电火花线切割加工时的切缝均比较小，排屑一般都比较困难，特别是加工电流比较大时，因产生的电蚀产物较多，切缝中的物理状态容易恶化，而且直径较细的电极丝承受电流的能力也有限，这时，我们可以采用增大电极丝直径的方法来提高切削速度，我们知道，电极丝承受峰值电流的大小是与其截面积成正比的，增大电极丝直径有利于施加大峰值电流，从而提高切割速度。当然，增大电极丝直径，也增加了切缝宽度 b，从这点上来看对提高切割速度不利。但在两者的综合比较下，增大峰值电流对提高切割速度还是起了主导作用。所以，在追求高效切割时，一般还是采用粗丝并加大峰值电流进行加工。电极丝直径与切割速度的关系如图 3.4-11 和表 3.4-3 所示。

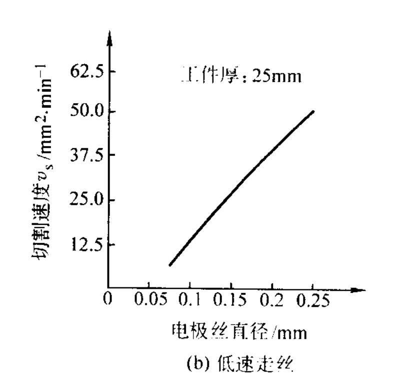
表 3.4-3 电极丝直径与切割速度 v_s 的关系

电极丝材料	电极丝直径 ϕ/mm	加工电流 I/A	切割速度 v_s /mm²·min⁻¹	切割效率 v_{sp} /mm²·min⁻¹
Mo	0.18	5	77	15.4
Mo	0.09	4.3	100	25.4
W20Mo	0.18	5	86	17.2
W20Mo	0.09	4.3	112	26.4
W50Mo	0.18	5	90	17.9
W50Mo	0.09	4.3	127	27.2

注：加工条件相同：Cr12，HRC > 550，H = 50 mm；t_i = 8 μs；t_0 = 24 μs；U_1 = 70 V；浓度为 15% 的 DX－1；走丝速度 = 10 m/min。



(a) 高速走丝

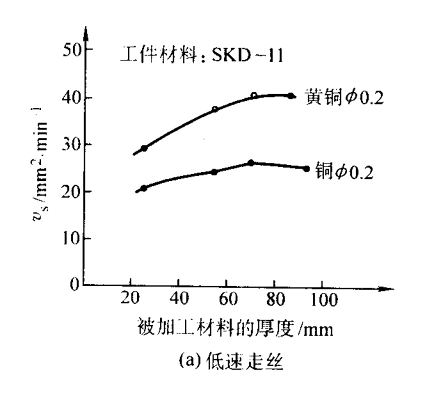


(b) 低速走丝

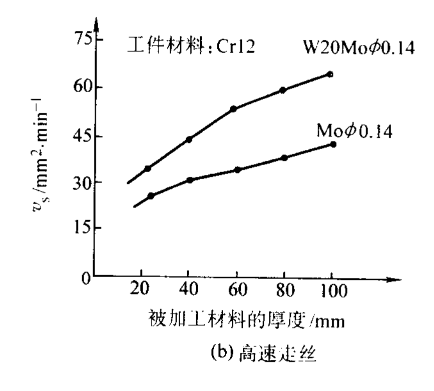
图 3.4-11 电极丝直径与切割速度的关系

2）电极丝材质　从表 3.4-3 已经看出，不同材质的电极丝在相同的工艺条件下所获得的切割速度是不一样的。高速走丝电火花线切割加工和低速走丝电火花线切割加工均有这样的规律，如图 3.4-11 所示。在高速走丝电火花线切割时，常用钼丝和钨钼丝作电极丝，钨钼丝不仅抗拉强度高，可以制成 ϕ0.06 mm 以下的细丝，而且切割速度也会比钼丝切割时高。低速走丝时，一般使用黄铜丝或紫铜丝，尽管黄铜丝损耗较大，但它抗拉强度高，加工十分稳定，切割速度比用紫铜作电极丝时要高，所以绝大多数慢速走丝线切割机均采用黄铜丝作电极丝材料。

试验表明，电极丝表面覆盖某些金属元素，有利于提高切割速度，而某些金属元素则不利于切割速度的提高。如图 3.4-12 所示。一般认为复合电极丝或镀覆电极丝在加工高温状态下，表面镀覆或所含的低熔点合金会产生汽化，吸收了加工区的大量热量，使得放电加工区的间隙状态得到明显的改善，有利于大峰值电流切割，提高切割速度。



(a) 低速走丝



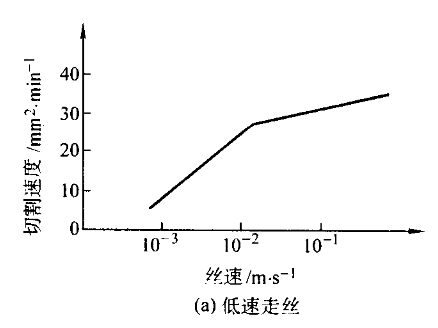
(b) 高速走丝

图 3.4-12 电极丝材质对切割速度的影响

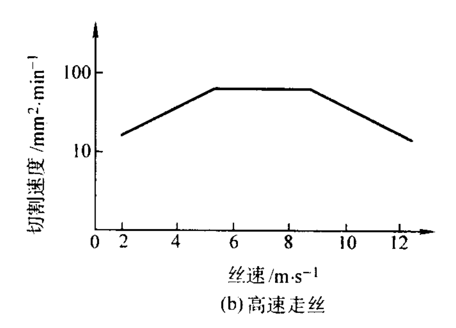
3）电极丝张力　电极丝的张紧力（张力）越大，在加工时所发生的振动振幅则会变小，因而切缝变窄，且不易发生短路，加工精度高。如图 3.4-13 所示。但张力过大，容易引起断丝，反而使切割速度下降。目前，低速走丝电火花线切割加工所用的常用电极丝，一般抗拉强度都比较高，其极限抗拉强度可达 20 N 以上。通常在使用过程中，张力一般都在 10 N 以上，视丝径而定。高速走丝电火花线切割加工时，其张力是随机变化的。因为高速走丝一般都没有恒张力装置，只能在绕丝时控制其预紧力。而切割时的电极丝张力主要来自于电极丝高速移动时的各种阻力。特别是各支撑件的运动摩擦力。虽然钼丝和钨钼丝的抗拉强度很高，绕丝时的预紧力也只有 5～10 N，但电极丝高速移动时各种阻力突变还是会引起断丝，所以要求运丝系统在高速运丝时必须保持平稳。

图 3.4-13　电极丝张力对切割速度的影响

4）走丝速度　电极丝的移动速度（即走丝速度）大小，不仅会影响电极丝在切缝加工区逗留时间及其所承受的放电次数，而且还会影响工作液带入切缝加工区的速度及电蚀产物的排出速度。很明显，走丝速度越快，切缝放电区温升就较小，工作液进入加工区速度则越快，电蚀产物的排出速度也越快。这就有助于提高加工稳定性，并减少产生二次放电的概率，因而有助于提高切割速度。走丝速度与切割速度的关系如图 3.4-14 所示，低速走丝电火花线切割的走丝速度一般为 0.5～10 m/min，高速走丝电火花线切割的走丝速度一般为 2～11 m/s。



(a) 低速走丝



(b) 高速走丝

图 3.4-14　电极丝走丝速度对切割速度的影响

由图 3.4-14 可以归纳出以下几点。

① 走丝速度过低时，不仅切割速度很小，而且加工不稳定，容易断丝。

② 走丝速度偏低时，提高走丝速度能明显提高切割速度。

③ 走丝速度提高到一定程度之后（如低速走丝时达 0.5 m/min，高速走丝时达 5 m/s），提高走丝速度虽可以进一步提高切割速度，但不是特别明显。

④ 走丝速度过高就会突出它的负面影响：低速走丝时电极丝消耗量明显增多，增加了生产成本；高速走丝时则会因往返走丝时停顿的时间相对增加，反而使平均切割速度下降。再者，丝速提高不可避免地会产生振动，影响加工精度。

⑤ 工件厚度增加或加工电流增大，都应适当提高走丝速度，以帮助改善排屑条件。例如，用高速走丝电火花线切割机加工 $H = 40$ mm 工件时，走丝速度以 5～7 m/s 为宜；当工件厚度提高到 $H = 210$ mm 时，走丝速度则为 6～8 m/s；如果工件厚度 $H = 610$ mm，则走丝速度应在 7～11 m/s 为好。

5）电极丝振动　一般来说，电极丝的强烈振动不仅会影响加工精度，而且容易引起与工件之间的短路，使切割速度下降甚至断丝，所以要尽量减少机床和走丝系统的振动。然而，在电火花线切割加工过程中，由于放电而产生的火花具有爆发力，因此电极丝的振动是不可避免的，而电极丝的微小振动还利于排屑，使切割速度得到提高。有人做过这样的实验，在慢速走丝线切割机的电极丝导向装置上加上一个可控制振幅的微弱振动器，迫使电极作一定幅度的振动，实现所谓的"清洁加工"，结果发现切割速度明显提高。此举虽然可以提高切割速度，但由于电极丝在整个切缝中的不同横截面上的振幅不同，各横截面上的放电通道的宽度也不同，易引起几何形状失真，影响加工精度，因此此法一般不予采用。

6）进电方式　脉冲电源的能量是通过进电导电块传递给电极丝而在加工区放电释放的，其进电方式好坏将直接影响脉冲电流的通过、并影响切割速度。因此，在线切割加工时，均要求电极丝与进电导电块有良好的接触。如果导电不良，其接触电阻就大，通过加工电流时就会有较大的能量损耗，使供应给加工区的能量相应减少而使切割速度下降；严重时还会发生在导电部位产生火花放电，这样实际上导电部位成了加工区，使导电块迅速电蚀而失去导电作用。所以，要尽量减小进电处的接触电阻，保持导电部位的清洁，减小能量损耗，提高切割速度。在高速走丝电火花线切割加工时，进电点应尽量靠近放电加工区，并采用上丝架和下丝架二点进电，以保证进电导电块与钼丝有良好接触，减少钼丝电阻压降影响。

① 电极丝的高速移动必然会产生振动，如进电导电块与电极丝接触不是很好，则极容易发生火花放电；同时，电极丝的高速移动还会导致进电导电块的磨损，时间长了也会形成不良接触而发生火花放电。

② 电极丝高速移动中所发生的振动，有时会使电极丝与进电导电块瞬间不接触，而在极间发生开路，严重时正常的进给状态也会瞬间失控，同样也影响传输给放电间隙的能量。为此，不少机床在上、下导向器附近都设有导电块，以此来改善进电条件。

③ 由于钼丝和钨钼丝直径较细小，加上本身的电阻率较大，从进电处至放电点一段电极丝电阻也是不可忽略的，进电处距离放电点过远，将增加线路电阻，也会明显影响输送给放电加工区的能量，导致切割速度下降。为了减少电极丝电阻影响，应该使进电导电块尽量靠近加工区。

（2）工作液对切割速度的影响

1）工作液的种类　电火花线切割所用的工作液有煤油、去离子水和皂化油乳化液三大类。用煤油作加工液时，加工表面的质量和加工精度都很好，但在进行粗加工时，由于放电电流较大，放电区域易分解成大量的炭粒，使加工区物理状态恶化，切割速度很低，甚至引起烧丝。加上煤油极易着火，必须采用浸没式加工，而不允许采用喷油方式。所以，通常很少采用煤油作工作液，国外有些品牌机采用两种工作液系统，粗加工时用水，以提高加工速度和加工稳定性，而在精加工时采用油以提高加工精度。去离子水不会着火，而且黏度低，切割效率较高，是低速走丝电火花线切割加工常用的工作液。水是弱电解质，加工时又会混有大量的电蚀产

物，其介电性能是很低的，不能满足放电加工的需要。用去离子水作工作液，能获得较好的加工效果。去离子水的电阻率与切割速度之间的关系如图 3.4-15 所示。

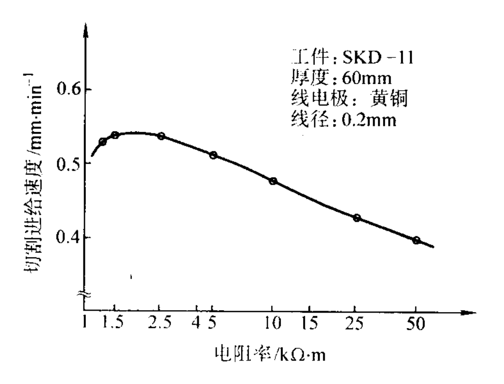


图 3.4-15　工作液电阻率对切割速度的影响

电阻率过低不能进行稳定的切割，提高工作液电阻率有助于提高加工速度；但电阻率的增大，又会使放电间隙减小、增加排屑的困难。若电阻率达到一定程度后（如 40×10^3 Ω·cm)，再增加电阻率，切割速度反而下降。但为了保证加工精度，实际使用的去离子水的电阻率一般控制在(3～10) $\times10^4$ Ω·cm 范围内。去离子水的最大缺点是会使工件生锈，为了解决工件生锈问题，我国科技工作者在开发高速走丝电火花线切割加工技术时采用了乳化液，俗称皂化油。乳化液作工作液，能获得较好的工艺效果。在相同的工艺条件下，用皂化油乳液进行电火花线切割加工时，虽切割速度会比采用去离子水时低一些，但不仅工件不生锈，而且加工比较稳定，断丝现象明显减少。由于乳化液黏度较高，在低速走丝情况下难于进入切缝加工区，给排屑带来困难，切割速度降低甚至无法加工。

2）乳化液成分和浓度　国内研制了许多种不同的皂化液，其成分及物理性能不一，各自适用于不同的场合，切割效果也不一样。以 12%浓度全部用自来水配制的 DX-1 工作液为标准，其切割速度为 100%；则 TM-1 型工作液为 95%，TM-2 型为 105%；航天 50Z-I 型为 135%，航天 50Z-II 型为 150%；磨床乳化液仅为 75%。表 3.4-4 是乳化液浓度对切割速度的影响，在切割工件厚度不大的情况下，乳化液浓度越高，其切割速度会下降。但在切割厚度较大的工件时，宜选用浓度较大（黏度较大）的工作液，以利于借助电极丝的高速移动带入切缝加工区，也利于电蚀产物的排出。

表 3.4-4　乳化液浓度与切割速度

乳化液浓度	脉宽/μm	间隔/μm	电压/V	电流/A	切割速度 /mm²·min⁻¹
10%	40	100	87	1.6～1.7	41
	20	100	85	2.1～2.3	44
18%	40	100	87	1.6～1.7	36
	20	200	85	2.1～2.3	37.5

3）喷液方式与压力　对切缝加工区喷液，有助于排屑，并增加电极丝的冷却效果。喷液时，应该沿电极丝轴线方向喷射，最好是设置喷液使环绕电极丝喷入切缝加工区。切忌沿电极丝横向喷入，否则会引起电极丝的横向振动。由于低速走丝的排屑条件较差，增大喷液压力有助于提高切割速度，目前高档慢走丝线切割机的工作液喷流压力都达到了 1～2 MPa。参见图 3.4-16。而高速走丝时排屑条件较好，喷液压力的变化对其切割速度影响不大，只需保证有足够的喷液流量即可。

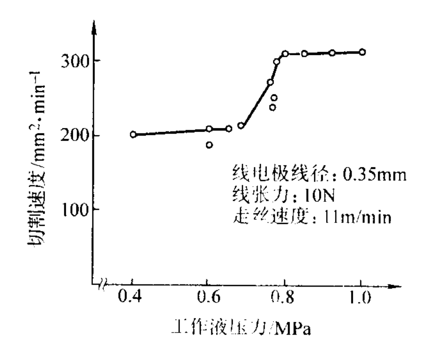


图 3.4-16　工作液压力与切割速度的关系

(3) 工件材料及厚度对切割速度影响

工件材料不同，其切割速度也明显不同。一般来说，铝合金的切割速度比较高，但铝材料容易氧化，表面易形成氧化膜，从而影响其导电性能，导致加工异常。而切割硬质合金、石墨以及聚晶等材料，其切割速度就比较低。表 3.4-5 列出了在同样加工条件下，切割不同材料时的切割速度，加工铝的切割速度几乎是加工硬质合金的 10 倍。

表 3.4-5　不同材料的电火花切割速度

工件材料	铝	模具钢	钢	石墨	硬质合金
切割速度/mm²·min⁻¹	230	57	40	36	22

切割薄工件时，由于脉冲放电的蚀除速度会远远大于跟踪进给速度，极间不可避免地会出现大量空载脉冲而影响切割速度。在这种情况下，切割速度会随工件厚度的增加而增加，但工件厚度的增加又不利于排屑，实际上当工件厚度超过一定数值时，工件厚度的增加反而会导致切割速度下降，甚至无法稳定加工。切割所用的电极丝丝径不同，出现最高切割速度的厚度也不同，如图 3.4-17 所示。从图中还可以看出，用细小电极丝难于切割大厚度的工件。如果是高速走丝，其本身的排屑条件较好，随工件厚度增加而导致切割速度下降的现象会晚一点，且没有图 3.4-17 所示低速走丝情况那样明显，但它们的影响规律是相同的。除上述工件材质和厚度外，工件材料的构造均匀性、热处理后的内应力以及磨削加工后的剩磁等，也会对切割速度产生一定的影响。

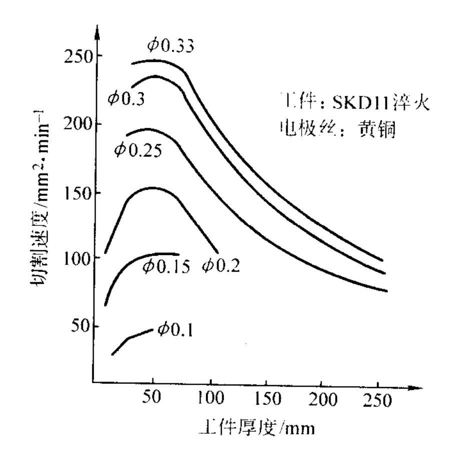


图 3.4-17　最大切割速度与工件厚度的关系

(4) 进给控制对切割速度的影响

1）进给速度　理想的电火花线切割加工应该是进给速度完全跟踪其加工的速度。进给速度过快容易造成频繁的瞬

间短路，使切割速度下降；进给速度过低又容易造成频繁的瞬间开路，同样会使切割速度下降，甚至有可能引起断丝。要实现理想的跟踪进给，必须提高进给控制性能。好的控制系统，不仅要求控制系统有合适的灵敏度，而且要及时地准确检测极间物理状态，并根据工艺条件及极间物理状态变化，智能性地进行跟踪控制。目前，我国生产的高速走丝电火花线切割加工机床，其控制系统都不太完善，需要操作人员根据自己的经验来调节。实践经验表明，在高速走丝电火花线切割加工时，常采取过跟踪进给，即所谓的半接触加工，这种加工方式从波形上看允许有一部分短路波形，而抑制其开路波形出现。这样控制肯定会影响切割速度，但瞬间短路会抑制电极丝振动，有利于提高加工稳定性而避免断丝现象产生。低速走丝电火花线切割加工时，则因排屑条件差而不允许瞬间短路。

2）进给控制方式　电火花线切割加工的进给系统，目前有伺服进给控制、自适应控制和智能控制方式等多种方式。伺服控制器根据加工间隙的状态变化，不断地自动调整其进给度，使加工稳定在设定的目标附近，以获得较高的切割速度。目前高速走丝电火花线切割加工普遍采用这种控制方式，可以满足生产需要。自适应控制进给方式不仅能根据加工间隙状态的变化来控制进给速度，而且还可以根据不同的工艺条件来调整原先设定的控制目标，如工件材料变化，厚度变化或加工要求变化（粗加工还是精加工）等。该系统都能自己适应并作相应的调整。这种控制方式能获得更好的工艺效果，如图 3.4-18 所示。有的低速走丝电火花线切割机还借助于专家经验对切割过程进行智能控制，如拐角加工、变厚度加工、特殊材料加工等。可以获得最佳的切割速度和最好的工艺效果。

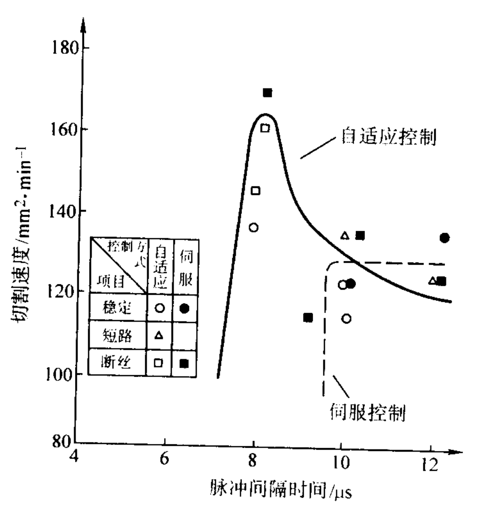


图 3.4-18　自适应控制与切割速度的关系

3　影响加工精度的主要因素

数控电火花线切割加工的加工精度包括加工尺寸精度、间距尺寸精度、定位精度和角部形状精度。影响电火花线切割加工精度的因素很多，它主要有脉冲参数、电极丝、工作液、工件、进给方式、机床精度及加工环境等，如图 3.4-19 所示。

3.1　加工尺寸精度

影响电火花线切割加工尺寸误差的因素很多，主要有机床本身的制造精度、加工过程的放电间隙变化以及电极丝损耗等。下面我们将有重点地进行深入讨论。

（1）机床种类

目前，电火花线切割机床主要有高速走丝电火花线切割机床和低速走丝电火花线切割机床两大类。由于高速走丝电火花线切割机床在设计制造过程中，机床结构比较简单，而且高速走丝系统也容易产生振动和磨损，所以高速走丝电火花线切割机床的精度一般都比低速走丝电火花线切割机低。实际上，低速走丝电火花线切割机的结构和制造精度也各有不同，所能达到的加工尺寸精度差异较大。根据电火花线切割机床所能达到的加工尺寸精度不同，我们把全球的各种电火花线切割机床分为普通型、标准型、精密型和超精密型，并形成宝塔式分布。第一类普通型电火花线切割机床量大面广，加工尺寸精度在 ±0.01 mm 范围内，$R_a < 2$ μm；第二类为标准型，加工精度在 ±0.005 mm 之内，$R_a < 0.5$ μm；第三类为精密型，加工精度在 ±0.003 mm 之内，$R_a < 0.2$ μm；第四类超精密型，产量较少，它采用了众多高新技术，以保证加工尺寸误差在 0.001～0.002 mm 之内，而 $R_a < 0.1$ μm。

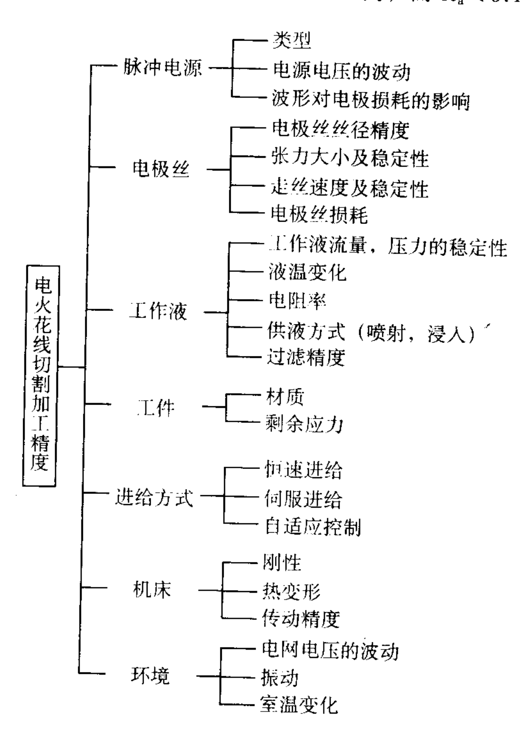


图 3.4-19　影响线切割精度的主要因素

（2）放电间隙变化

在电火花线切割加工时，电极丝与工件之间存在一定的放电间隙，如果这个放电间隙是不变的，则可以在加工轨迹编程时进行补偿，以获得我们所需要的加工尺寸。然而，放电间隙大小实际是变化的，并受极间脉冲电压、单个脉冲放电能量（脉宽与脉冲峰值电流）以及电极丝振动等机械因素影响，其关系在式（3.4-9）中列出：

$$\delta = k_n u_{vn} - k_t t^{-n} + k_R w^{0.4} + A_m \qquad (3.4\text{-}9)$$

在生产实践中，直接检测放电间隙 δ 变化比较困难，而是检测电火花线切割加工时的切缝宽度 B：

$$B = d + 2\delta \qquad (3.4\text{-}10)$$

式中，B 为切缝宽度；d 为电极丝直径；δ 为放电间隙。

式（3.4-10）中，电极丝直径 d 的丝径精度及损耗对切缝宽度和加工精度有直接影响。我们将在后面详细讨论。在这里，我们主要研究放电间隙变化对加工精度的影响。

1）脉冲电源电压 U　由式（3.4-9）可知，脉冲电源电压愈高，极间空载电压也高，切缝就宽；空载电压降低，切缝宽度也随之降低，如图 3.4-20 所示。由此可知，电压的变



化会影响切缝宽度变化，也影响加工尺寸精度。

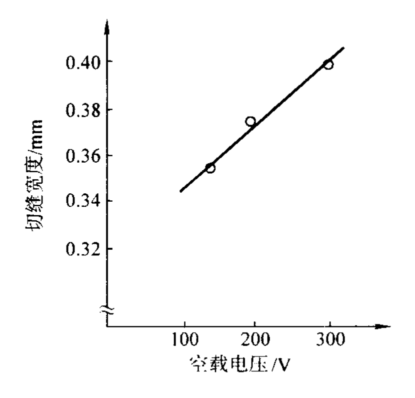


图 3.4-20　切缝宽度与空载电压的关系

2）平均加工电压　极间平均电压升高也会导致切缝宽度的增加，如图 3.4-21 所示。图 3.4-21 关系曲线的试验条件为：在低速走丝电火花线切割机上用 $\phi0.2$ mm 的黄铜丝加工厚度为 10 mm 的 SKD－11 钢板，工作液为去离子水，电阻率为 4×10^4 Ω·cm，分别以 0.7 mm/min 和 1.2 mm/min 的进给速度恒速进给，脉冲的其他参数可调。从图 3.4-21 可以看出，极间平均电压对切缝宽度的影响是较大的。其变化量已接近 0.02 mm。

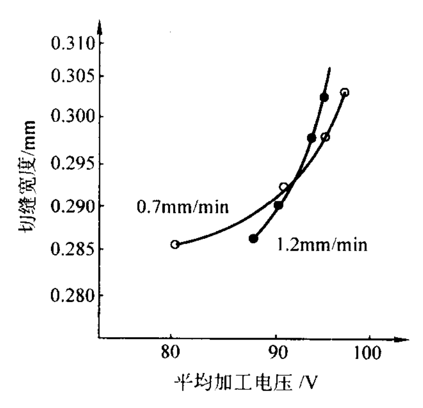


图 3.4-21　切缝宽度与加工电压的关系

3）单脉冲能量　由式（3.4-9）可知，随着单脉冲能量增加，放电间隙也会随之增大，切缝增宽。实验表明，增大脉宽或峰值电流都会增加脉冲能量，使切缝增大，但增加脉冲电流的影响要比增加脉宽更为明显。在高速走丝情况下，常用的脉冲峰值电流一般都小于 20 A，所以在编制程序时，常给予 0.01 mm 的放电间隙补偿；如果脉冲峰值电流增加到 50 A 以上，则实际放电间隙就不是 0.01 mm，而达到 0.02 mm 以上，甚至更大一点。低速走丝电火花线切割加工，所用的脉冲峰值电流较高，其放电间隙也比较大，一般也在 0.03 mm 以上。

4）加工进给速度　图 3.4-22 是切缝宽度与加工进给速度的关系曲线。由图可知，进给速度快，切缝就窄；在伺服进给情况下，即使是进给速度发生较大的变化，其切缝宽度变化也只有 0.008 mm 左右。与恒速进给方式相比，伺服进给方式的切缝宽度变化比较小。所以，在电火花线切割加工时都采用伺服进给而不采用恒速进给，并在加工过程中尽量提高加工进给速度，以便在提高切割速度的同时能获得较好的加工精度。

5）工作液的电阻率　工作液的电阻率大小反映工作液中含有带电粒子及杂质的浓度，直接影响工作液的介电强度。因而，工作液的电阻率愈高，其切缝宽度就愈窄，有利于提高加工精度。电阻率过大，不仅会因切缝太小而影响切割速度，而且还会因窄缝的电蚀产物不易排出而产生二次放电，影响加工精度。在低速走丝情况下，切缝中部明显扩大，形成腰鼓形。随着工作液电阻率的逐渐减小，切缝宽度将随之增大，如图 3.4-23 所示。过低的电阻率不仅使极间漏电流增加，影响切割速度，而且会使加工变得极不稳定。顾及加工精度和切割速度要求，电阻率一般都控制在（3～8）$\times10^4$ Ω·cm。

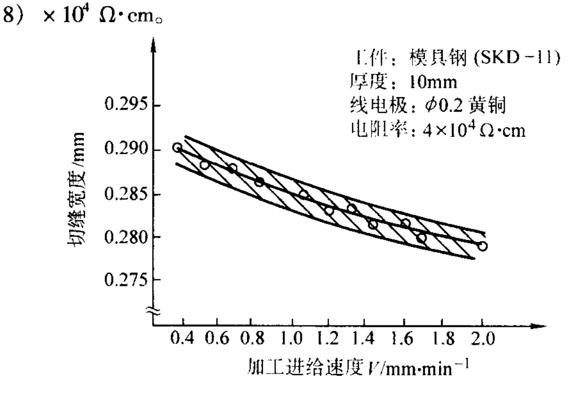


图 3.4-22　切缝宽度与加工进给速度的关系

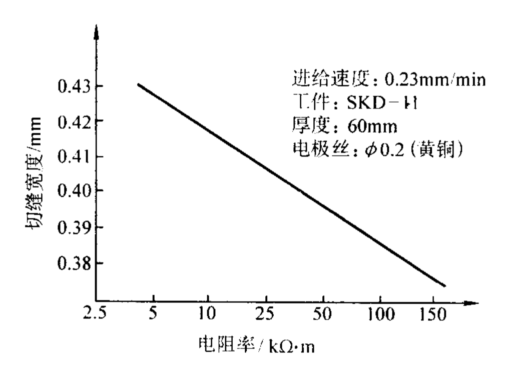


图 3.4-23　切缝宽度与工作液电阻率的关系

6）工件厚度与电极丝振动　随着工件厚度的增加，电极丝在放电过程中引起的振动将被抑制，切缝中电蚀产物的排屑将愈来愈困难，导致切缝中的电蚀产物浓度增加，二次放电的概率随之增大，切缝也会相应变宽，如图 3.4-24 所示。但工件厚度过小时，电极丝的振动得不到抑制，切缝反而会随工件变薄而变宽。在高速走丝时，薄工件的切缝反而宽，而厚度增加对排屑的影响也不像低速走丝时那样明显。即随着工件厚度增加，切缝宽度增加的情况不是特别明显，只是在工件厚度大幅度增加时，才能明显看出这种规律。

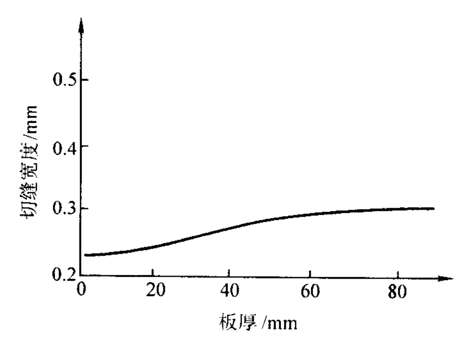


图 3.4-24　工件厚度与切缝宽度的关系

（3）影响加工尺寸精度的其他因素

除机床种类和放电间隙变化外，影响加工尺寸精度的主要因素还有电极丝的丝径精度及损耗、工件材质及加工方

法、环境温度及振动等。

1）电极丝丝径精度及损耗　电极丝丝径大小及其精度与切缝宽度直接有关。丝径的变化必然会产生加工尺寸误差，丝径增大，切缝变宽，工件的加工尺寸误差也随之增大。至于电极丝的损耗，对单向移动的低速走丝来说，对加工尺寸精度影响并不明显，甚至可以忽略不计。因为低速走丝都是以未加工过的新丝进入加工区，而加工损耗后的电极丝移出加工区，在整个加工过程中都是如此，因而电极丝损耗不会明显影响加工尺寸误差。如果说电极丝损耗有影响，也只是上下尺寸有所不同，进口处新丝直径大，切缝也大；而出口处损耗过的丝径有所减小，切缝也随之减小，但出口处的电蚀产物浓度大，二次放电概率增大，实际放电间隙应误会增大，二者之间相互补偿结果对加工尺寸误差就会不太明显。但高速走丝不同，由于电极丝在整个加工过程中反复使用，新电极丝刚使用时直径大，而随着加工时间的延续，电极丝丝径会逐渐减小，根据式（3.4-10）可知切缝宽度是随加工时间的延长而逐渐减小的，加工尺寸误差也会愈来愈大。为此，高速走丝电火花线切割要特别注意电极损耗问题。

2）工件材质及加工方法　在相同的加工条件下，同一种材料的切缝宽度应该是一样的，但材质不均，特别是淬火后的工件材料，都会存在一定的内应力，加工时内应力释放会严重影响加工尺寸误差。电火花线切割加工时，除注意工件材料淬火均匀外，还要注意加工方法。如尽量采用穿丝孔起步，让工件四周材料相互连接制约；或是正确设定切割方向和路线，让需加工的零件固定连接在装夹座上，防止应力释放时引起加工零件的空间位置变化。

3）环境条件　影响加工精度的环境条件主要是室温和振动。有的专家曾进行深入研究，发现室温变化1℃，中型机床在全行程范围内可产生0.001 mm的误差；而环境存在振动源，也会使电极丝（工具）与工件的相对位置变化。因此，在精密加工时，应设法使环境温度恒定，并与周围的振源隔离。

3.2　形位精度

电火花线切割加工的形位精度包括平直度、棱角圆弧半径、间距精度和定位精度等。

（1）平直度

所谓平直度是指沿工件高度方向的上、中、下各处的尺寸误差，主要与走丝方式、电极丝张力、支点位置及工件厚度等因素有关。

1）走丝方式　电火花线切割加工的走丝方式不同，其切缝的剖面形状也会有所不同，如图3.4-25所示。低速走丝时腰鼓形的切缝，一方面是由于放电力作用下产生振动，另一方面是切缝放电区电蚀产物存在引起二次放电。提高走丝速度和增加电极丝的张力，有助于电蚀产物的排出和减小

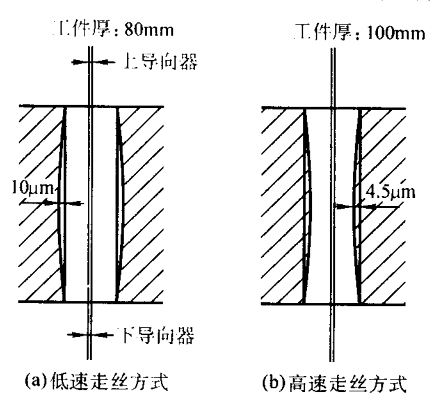


图3.4-25　不同走丝方式下的切缝剖面形状

电极丝的振幅，都能减小平直度误差。高速走丝排屑条件好，而工作液的黏度又比较高，可以抑制电极丝的振动，所以中间一段不会出现“腰鼓形”。但高速走丝的电极丝振幅主要来自导丝系统，工件上下二端振幅较大，所以切缝剖面呈现“枕形”。提高电极丝的张紧力可以减小平直度误差，但在高速走丝情况下提高走丝速度唯在超薄工件切割时才有明显效果。

2）导向支点位置　导向支点愈靠近工件上下端面，愈有助于减小平直度误差。如果上下支点跨距较大，而工件仅仅靠近下支点，则会使上端的切缝宽度大于下端；如果是靠近上支点，则切缝下端的缝宽又会比上端大，同样会出现较大的平直度误差。

3）工件厚度　随着工件厚度的增加，电火花线切割加工时的进给速度相应降低，这样，放电区内产生二次放电的机会将随之增多，从而增加平直度误差。如图3.4-26所示。但在切割薄工件时，这种随工件厚度而变化的关系就不太明显。由于高速走丝时排屑条件较好，工件厚度对平直度影响只是在大厚度切割时比较明显。

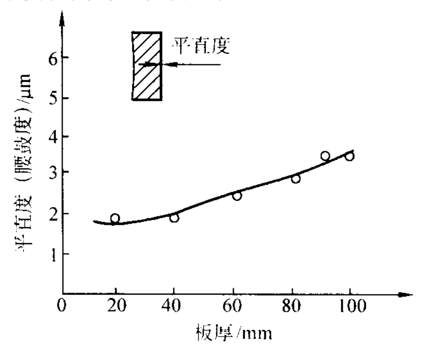


图3.4-26　工件厚度与平直度的关系

（2）棱角形状精度

由于电极丝半径和放电间隙的存在，要在凹模上加工出一个棱角是不可能的，在不考虑其他因素影响情况下，也会形成一个小圆角，小圆角半径

$$r = \frac{1}{2}d + \delta \tag{3.4-11}$$

式中，r为小圆角半径；d为电极丝直径；δ为单面放电间隙。

实际上，电火花线切割加工时由于放电力的作用而产生的电极丝（放电点）滞后现象对小圆角影响远远要超过电极丝半径和放电间隙的影响。如图3.4-27所示。当加工过程沿L_2方向进给到拐角处时，电极丝放电点实际上并没有到达拐角点，而是滞后了L。当加工继续沿L_1方向加工时，电极丝放电点只好从滞后L处就开始逐渐拐弯，直到加工一定距离后才到达所要加工的直线上，这样就在拐角处形成一个“塌角”。为了减小棱角加工形状误差，就应该设法减小电极丝的滞后现象，如到达拐角处时降低进给速度、减小脉冲放电能量，甚至进行轨迹补偿等等。拐角控制专用软件可使塌角尺寸大幅减小。

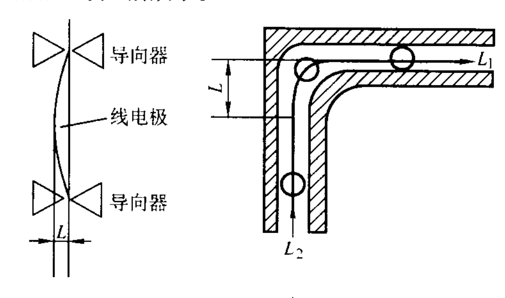


图3.4-27　电极丝滞后导致的工件塌角



(3) 间距精度

所谓间距精度是指同一块模板上各个型孔之间的相对位置误差。电火花线切割加工的间距误差主要取决于以下因素。

1) 机床本身的精度，包括机械传动和控制精度等。

2) 工作环境温度和工作液温度　为了获得高精度，不仅室内要保持恒温，而且工作液也应有恒温装置。

3) 工件内部残余应力　在进行电火花线切割加工时，工件内部残余应力释放将引起切割变形。在生产实践中除注意淬火均匀以及采取高温回火外，还应注意预加工和采取多次切割工艺，以减小残余应力影响。

4) 工作液的电阻率和电源参数对间距精度也有一定影响，应在加工过程中尽量保持不变。

(4) 定位精度

电火花线切割加工的定位方式主要有两种：一是以孔为基准，通过电极丝与工件的接触（或产生火花）自动找正孔的中心；另一种是以端面为基准，找正加工的相对位置。影响定位精度的因素主要有工件基准面的状态、电极丝张力及振动情况以及工作台的运动惯性等。

1) 工件基准面状态　作为基准面，必须清洁且无毛刺，并用磨床磨好，保证垂直度和平行度。装夹在工作台上后，其基准面必须与坐标轴方向平行，与工作台面保证垂直度。

2) 电极丝的张紧力及振动情况　电极丝必须有足够的张紧力，不允许有弯曲现象，且保证与工作台垂直。具体方法是将校正电极丝的标准块放在工件表面（或放在工件支撑架上），从 L_1、L_2、L_3、L_4 四个方向先后靠近工件，调节电极丝垂直度，使测量面的上下火花均匀。在高速走丝情况下，由于电极丝振动较大，不易获得很高的定位精度。通常是可以用降低走丝速度（无调速功能的机床只好用人工方法拨动储丝筒）方法，在调整到上下火花均匀时即可。注意，周期调整电极丝垂直度和自动定位时，极间火花应该调到最弱档，或是设置定位调整的测量火花。如果此刻选用较强的火花，不仅会发生断丝现象，而且严重影响定位精度。

3) 工作台的运动惯性　在自动定位时，如果工作台的运动惯性大会产生超调现象而影响定位精度。在实际操作时，经常是限制机床的移动速度，避免超调现象发生，以提高定位精度。

总之，在找正定位时，定位精度与操作者的经验、操作水平关系较大，在自动找正定位的情况下，与机床的检测系统、控制水平关系就显得尤其重要。

4　影响加工表面质量的主要因素

电火花线切割加工的表面质量主要包括加工表面粗糙度、切割条纹及表面组织层变化层等三部分。

4.1　影响加工表面粗糙度主要因素

电火花线切割加工表面是由无数的放电小凹坑组成的，因而无光泽，但润滑性和耐磨性一般都比机械加工同等级粗糙度的表面要好。影响加工表面粗糙度的因素虽然很多，但主要是脉冲参数影响。此外，工件材料、工作液种类以及电极丝张紧力与移动速度等有一定影响。

(1) 脉冲参数

脉冲参数对加工表面粗糙度 R_a 的影响如图 3.4-28 ~ 图 3.4-31 所示。由图可以看出，无论是增大脉冲峰值电流还是增加脉宽，都会因它增大了脉冲能量而使加工表面粗糙度 R_a 值增大。空载电压升高，由于电源内阻不变，脉冲峰值电流会随之增大，因而加工表面粗糙度 R_a 值也明显增大。电火花成型加工，一般都认为脉冲间隔的变化对加工表面粗糙度没有什么影响，但在电火花线切割加工时，脉冲间隔的影响则是不可忽略的。特别是在高速走丝或切割薄工件的情况下，这种变化还比较明显。

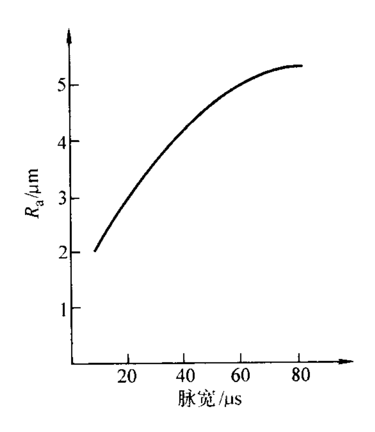


图 3.4-28　脉宽与表面粗糙度的关系

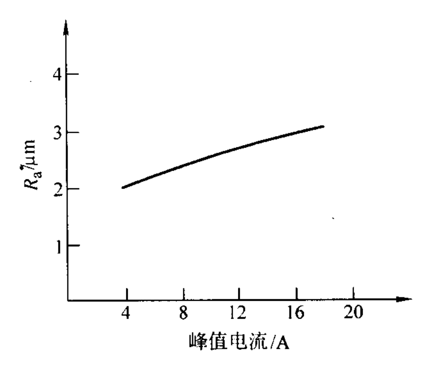


图 3.4-29　峰值电流与表面粗糙度的关系

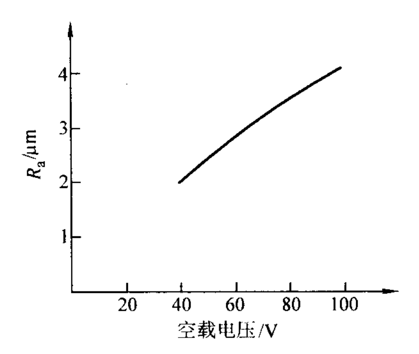


图 3.4-30　空载电压与表面粗糙度的关系

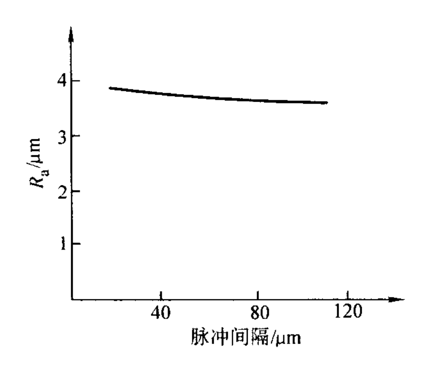


图 3.4-31　脉冲间隔与表面粗糙度的关系

从图 3.4-28 ~ 图 3.4-31 还可以看出，增大峰值电流、脉宽等脉冲参数有利于切割速度的提高，也会使加工表面粗糙度 R_a 值增大，只是影响的程度不一而已。图 3.4-32 是切割速度与表面粗糙度的关系曲线，是用 ϕ0.20 mm 黄铜丝在低速走丝机上加工 SKD－11 钢所得到的试验曲线。

(2) 工件材料

由于工件材料的热学性质不同，在相同的脉冲能量下加工的表面粗糙度是不一样的。加工高熔点材料（如硬质合金），其加工表面粗糙度值就要比加工熔点低的材料（如铜、铝）小，当然，切割速度也会下降，符合图3.4-32所示的关系。

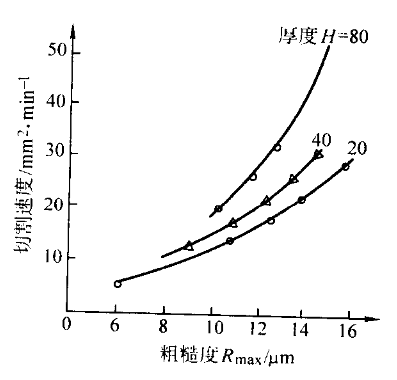


图3.4-32　切割速度与表面粗糙度的关系

(3) 工作液

采用煤油作工作液时，切割速度低，但表面粗糙度较好；而用去离子水作工作液时，切割速度较高，而加工表面粗糙度 R_a 值也会相应增大。高速走丝电火花线切割加工常用皂化油乳化液作工作液，但种类型号不同，也会影响切割速度和表面粗糙度。

4.2　影响切割条纹的主要因素

电火花线切割加工的表面，从微观来看是由无数个放电小凹坑叠加而成的表面，其放电凹坑的深度直接影响加工表面的粗糙度。但从微观来看，电火花线切割加工表面会呈现许多切割条纹。这在高速走丝电火花线切割加工中尤为明显。影响切割条纹深度与宽度的因素很多，包括脉冲参数、走丝方式及其稳定性、工件厚度及其材质的均匀性、工作液种类与成分以及进给控制方式等。表3.4-6是不同加工条件下的切割条纹最大深度，试验材料为Cr12MoV，淬火硬度60HRC。从表3.4-6可以看出，切割条纹深度要远远大于加工表面粗糙度 R_{max}，欲想提高电火花线切割加工表面质量，就必须设法减少切割条纹影响。

表3.4-6　电火花线切割加工条纹

试件序号	设备型号	线电极材料	走丝方法	走丝速度 /m·min⁻¹	加工电压 /V	加工电流 /A	工作液 种类	工作液 电阻率 /Ω·cm	条纹最大深度 /μm
1	CKX-2A	钼丝	快速	500	75	1.7	DX-1	250	26.5
2						1.2			17.5
3						0.5			15.5
4	HC-6	黄铜丝	慢速	4	60	5.5	去离子水	4×10^4	22.5
5				3		4.5			16.5
6				0.8		0.3			15.0

(1) 脉冲参数

脉冲参数的改变，不仅会影响放电间隙大小，而且对电极丝振动也会有影响。降低脉冲电压或者减小单脉冲放电能量，有利于减小单面放电间隙及电极丝的振动振幅，也有利于减小切割条纹的深度。对低速走丝电火花线切割来说，由于运丝系统工作比较平稳，重要任务是设法稳定脉冲参数，减少放电间隙及电极丝振幅变化，以减小切割条纹深度。

(2) 走丝方式

走丝方式及运丝系统的稳定性对切割条纹的影响十分显著。一般来说，低速走丝电火花线切割加工，运丝系统比较平稳，远比高速走丝要好，所产生的切割条纹也不明显，很难用肉眼观察到。提高低速走丝的电极丝张紧力、缩短导向器与工件之间的距离、降低电极丝移动速度以及选用与电极丝丝径相匹配的导向器，都有助于电极丝运行稳定，减小条纹深度。高速走丝则不同，由于电极丝的高速移动，必然会引起的强烈振动，加上导向导轮不可避免地会产生径向跳动和轴向窜动。这些都会导致有规则的切割条纹的产生。实际上，电极丝在高速往返运动中，由于上下导向导轮的运动摩擦阻力不一，在切割加工时不仅会改变电极丝的张力，而且还会影响电极丝支点位置变化，使往返切割条纹十分明显。有人曾发现，用短钼丝加工可以改善表面切割条纹，其原理是每次电极丝换向移动时间间隔内实际切割长度控制在电极丝的半径范围之内。根据这一原理，采用短程往返走丝数字程序控制方法，效果十分明显。如果采用高耐磨性导向器，并使导向器尽量靠近工件，也能改善加工表面切割条纹，提高加工表面质量。

(3) 工件厚度与材质

切割的工件厚度越小，或是导向器离工件越远，其切割条纹就越明显。此外，如果工件材料中含有不导电的杂质，也会迫使电极丝“绕道而行”，产生明显的条纹，严重时还会影响加工精度。

(4) 工作液

工作液作为脉冲放电的介质，直接参与了放电加工的全过程，因此，对加工的工艺指标也是一个不可忽略的重要因素，能够应用于电火花线切割加工的工作液种类很多，不过目前用得最多的工作液还是去离子水（通常用于慢速走丝线切割机）和乳化液（用于高速走丝线切割机）。特别是应用于高速走丝线切割机上的工作液，还找到数种添加成分，研制成各种型号的乳化剂，用于改善其加工性能，不同的工作液有不同的介电强度，而且黏度和洗涤性也不一样，其中乳化液还有一定的电化学作用。但不管使用何种工作液，在放电加工中，其作用是共同的，归纳起来大致有以下几种。

1) 在加工区起冷却作用，即对电极丝和工件进行冷却。

2) 压缩放电通道，以集中放电能量。

3) 在放电区既要有具有快速的击穿效果，又必须具备消电离作用，快速恢复极间的绝缘状态。

4) 对放电产物的清除作用。

近年来，还研制出通过在皂化剂中添入某种化学元素，使之对钨钼材料具有镀覆作用，用于减少或补偿电极丝在加工过程中的损耗。

在同一加工条件下，使用不同的工作液，不仅切割速度不同，而且加工表面切割条纹也相差较大。所以在实际应用中，需根据所加工的材料及厚度，合理选择合适的工作液以满足您的加工要求。

4.3　影响加工表面组织变化层的主要因素

(1) 加工表面层的组织变化

在电火花线切割加工过程中，由于脉冲放电时所产生的瞬时高温和工作液冷却作用，工件表面会发生组织变化，并可粗略地分为熔融凝固层（包括新黏附的松散层和急冷凝固层）、淬火层和热影响层三部分，如图3.4-33所示。用扫描镜的电子探针附件测试Cr12试样的电火花线切割熔化层可以观察到下部是试样材料的基体，上半部是熔融凝固层，有人也称白层。全相分析认为该层残留了大量的奥氏体。在用钼丝和乳化液时，光谱分析和电子探针分析结果都说明熔融



凝固层内含有钼和碳的成分；如果使用铜丝和去离子水，则发现熔融凝固层内铜成分增加，但无渗碳现象。熔融凝固层硬度较大，耐磨性好，但它与基体的结合力有所降低，这对于承受冲击力的冲裁模是不利的，好在电火花线切割精加工时，整个熔融凝固层很薄，对冲裁模的实际使用并无多大影响。

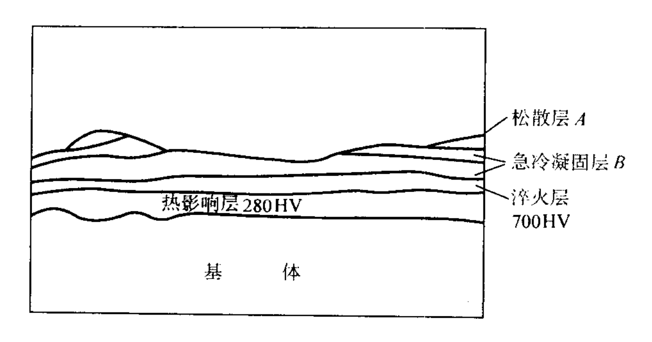


图 3.4-33　加工表面层变化断面图解

（2）变化层厚度

变化层厚度是指熔融凝固层的厚度。因放电的随机性较大，在同样的加工条件下，不同点的熔融凝固层的厚度明显不均匀。变化层厚度主要与脉冲放电能量有关，大约为 R_{max} 的 2～3 倍。

表 3.4-7 是在国产 DK7725 高速走丝电火花线切割机上进行工艺试验时所获得的数据。试验时用的工作液为航天 502－2 号皂化油 15%加自来水配制，电极丝为 ϕ0.13 mm 的 W20Mo 钨钼丝。从表 3.4-9 可以看出，熔融凝固层的厚度总体上来说随脉冲能量的增加而增加。

表 3.4-7　不同脉冲参数对熔化层厚度的影响

材料＼项目	脉宽 /μs	间隔 /μs	工作电流 /A	切割速度 /mm²·min⁻¹	熔化层 第一象限 厚度 /μm	熔化层 第一象限 R_a /μm	熔化层 第三象限 厚度 /μm	熔化层 第三象限 R_a /μm
Cr12MoV	0.5	2	1.3	12	11.03	0.58	12.04	0.62
	2	8	2	23	13.12	1.08	14.05	1.12
	8	32	3.9	53	16.82	1.9	17.82	2.05
	16	64	6.1	143	28.01	3.8	29.12	4.05
CrWMn	0.5	2	1.3	11.5	12.14	0.57	13.12	0.621
	2	8	2	22	15.13	1.04	16.01	1.1
	8	32	3.9	51	17.81	1.85	18.05	2.01
	16	64	6.1	140	30.19	3.7	31.01	4.0
Cr12	0.5	2	1.3	13	10.05	0.59	12.04	0.627
	2	8	2	24	12.15	1.10	15.05	1.2
	8	32	3.9	55	20.1	1.95	18.3	2.2
	16	64	6.1	146	32.15	3.9	35.13	4.3

（3）显微硬度

电火花线切割加工的表面，由于急热急冷影响，有一定的淬火作用，应该是硬的，特别是熔融凝固层，都有比较高的硬度。但电火花线切割加工的工件，如冲裁模的凸模和凹模，都是在淬火之后进行加工，放电时的急热急冷很难达到淬火时所需的温度和保温时间，所以电火花线切割加工的表面硬度会有所下降，出现软化层，特别是用水质工作液进行电火花线切割加工时，这种现象更为明显。图 3.4-34 是电火花线切割加工表面显微硬度变化曲线，从中还可以看出，用煤油作工作液时，加工表面显微硬度还会有所增加。加工表面软化层深度一般只有十几微米，且与加工时的脉冲能量有关。如果是用较大的脉冲能量在水中进行电火花线切割加工，它所产生的软化层影响是不可忽视的。有人曾分别用煤油和去离子水作工作液进行实验，发现用油加工的冲模的使用寿命比用水加工的冲模要高一倍。如果用精微规准进行加工，则不仅可以获得表面粗糙度值极小（$R_a \leqslant 0.1\ \mu m$）的镜面，而且软化层极薄，对模具使用寿命几乎无什么影响。电火花线切割加工获得的表面总体上是硬脆的，适于用超声波抛光等方法去除加工表面软化层，提高模具使用寿命。

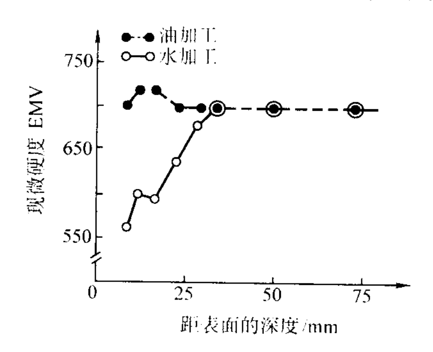


图 3.4-34　加工表面显微硬度变化

（4）显微裂纹与应力

电火花线切割加工表面由于受高温作用并在工作液中迅速冷却，一般都会产生拉应力，甚至出现显微裂纹。一般显微裂纹仅在熔融凝固层出现，且脉冲能量愈大或是工件材料愈硬脆，愈容易产生显微裂纹并出现某些空穴。如果用脉冲能量很小的窄脉冲进行加工（加工表面粗糙度 $R_a < 1.25\ \mu m$），即使是加工含钴量少的硬质合金，也不会产生显微裂纹。为避免加工表面显微裂纹的产生，在切割硬脆材料时，应尽量选用窄脉冲精规准加工。

5　影响电极丝损耗的主要因素

在电火花线切割加工中，电极丝的丝径损耗也是一项重要工艺指标，它直接影响电火花线切割加工的工艺效果。因而，如何减小加工过程中的电极丝的丝径损耗，一直是人们关心的问题。低速走丝时电极丝损耗对加工尺寸精度影响不大，但对其加工的平直度影响是不可忽视的；高速走丝时电极丝损耗则对加工精度影响比较明显，因为电极丝在整个加工过程中反复使用，在初始使用阶段丝径较大，切缝较宽，而随着加工时间的延续，电极丝的丝径会因损耗而逐渐减小，使切缝变窄，从而影响加工尺寸精度。影响电极丝丝径损耗的因素很多，主要有脉冲参数、脉冲电源波形、电极丝材质、工件材质以及工作液性能等。就加工材质来讲，相同的加工面积，硬质合金材料比其他一般铁基材料对电极丝的损耗要大得多。小脉宽加工也会使电极丝的损耗加大。

5.1　脉冲参数

增大单脉冲能量，增大脉冲宽度和峰值电流以及提高电流电压，有利于提高切割速度，对于降低电极丝的丝径损耗来说，增大脉冲宽度更为有效，如图 3.4-35 所示。一般来说，增大脉冲峰值电流会使电极丝损耗增大，但只要适当控制电流的上升速度，其电极丝损耗的增加是有限的。但峰值电流增加有利于提高切割速度，一个熟练的线切割操作者必须根据加工的侧重点，合理调配脉冲组合，以达到最佳状态。

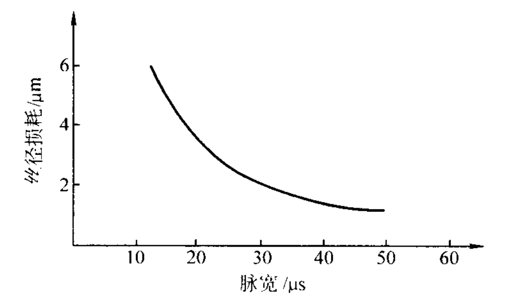


图 3.4-35 脉冲宽度对电极丝损耗的影响

5.2 脉冲波形

1）脉冲电流上升速度　增大脉冲电流的上升速度会增大电极丝的丝径损耗，且上升速度越快，电极丝的丝径损耗也愈大。图 3.4-36 是低速走丝电火花线切割加工的脉冲峰值电流上升速度对丝径损耗的影响试验曲线。图 3.4-37 是高速走丝电火花线切割脉冲前沿对丝径损耗的试验曲线，从中可以看出，脉冲前沿时间并非愈长愈好，而是有一个最佳值。

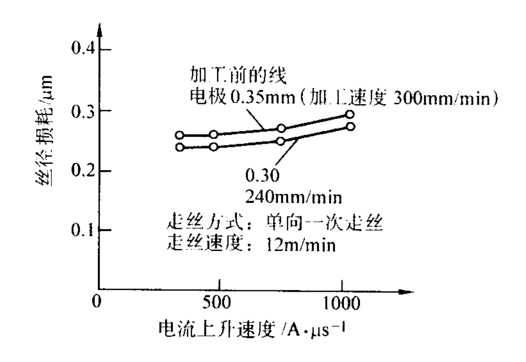


图 3.4-36 低速走丝脉冲电流上升速度对丝径损耗的影响

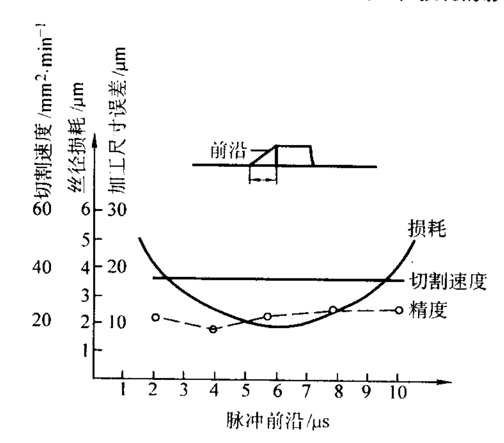


图 3.4-37 高速走丝脉冲前沿对丝径损耗的影响

2）脉冲电流波形　为了降低电极丝的丝径损耗，人们曾开发了除矩形脉冲之外的许多不同波形的电源，包括电流逐渐上升的三角波、电流逐渐下降的倒三角波、梯形波、馒头波、梳性波以及分组脉冲等。有的电加工设备生产企业还建立了脉冲波形库，可以根据工艺需要任意组合各种不同的脉冲波形。从以往的试验结果来看，梯形波和馒头波对降低电极损耗虽有一定的效果，但实施比较困难，而倒三角波效果不明显，所以都没有在生产实践中推广使用。数字分频式脉冲电源采用数字分频技术优化脉冲组合，对于降低电极损耗是有意义的。所谓分组脉冲，是将数个至数十个窄脉冲组合在一起输入放电间隙，进行放电加工，停歇一定时间后又将第二组窄脉冲输入放电间隙。停歇时间的长短视放电加工区极间物理状态恢复时间而异。与电蚀产物及放电加工余热扩散及排出情况有关。这种波形既可获得较高的切割速度和良好的表面粗糙度，又可以降低电极丝的丝径损耗。

5.3 电极丝材料及移动速度

为了获得好的工艺效果，应选用加工稳定性好、抗拉强度高，且耐损耗的材料做电极丝。常用的有黄铜丝、紫铜丝、钨丝、钼丝、钨钼丝等。黄铜丝加工稳定性特别好，也有一定的抗拉强度，但电极丝损耗较大，只适宜用在低速走丝电火花线切割加工；在低速走丝电火花线切割加工中，电极丝损耗大，影响加工表面的平直度，紫铜丝虽损耗较小，但抗拉强度差，一般很少使用。钼丝、钨丝及钨钼丝的抗拉强度比较高，熔点也高，比较耐电腐蚀，可以制作成细丝电极，通常用于高速走丝电火花线切割加工场合或是低速走丝电火花线切割加工用细丝加工场合。如表 3.4-8 所示，钨丝的延伸率、抗拉强度以及熔点都更适合电火花线切割要求，只是材质较脆，故纯钨丝不适合作电极丝。

表 3.4-8 钨、钼极其合金丝性能对照表

材料	适用温度/℃ 长期	适用温度/℃ 短期	沿伸率 /%	扩张力 /MPa	熔点 /℃	传递能量 /J	电阻率 /μΩ·m
W	2 000	2 500	0	1 200 ~ 1 400	3 400	2×10^{-2}	0.061 2
Mo	2 000	2 300	30	700	2 600	1×10^{-2}	0.047 2
MoW50	2 000	2 400	15	1 000 ~ 1 100	3 000	1.5×10^{-2}	0.053 2

钼丝有一定的韧性，虽抗拉强度稍低一点，但仍可满足高速走丝电火花线切割需要，是当前应用最广的电极丝。然而，在超大厚度切割时，普遍认为，用钨钼合金电极丝可以提高切割速度和使用寿命。此外，电极丝的移动速度对损耗也有一定的影响。特别是低速走丝场合，电极丝损耗几乎随电极丝移动速度增加而成反比例下降，如图 3.4-38 所示。

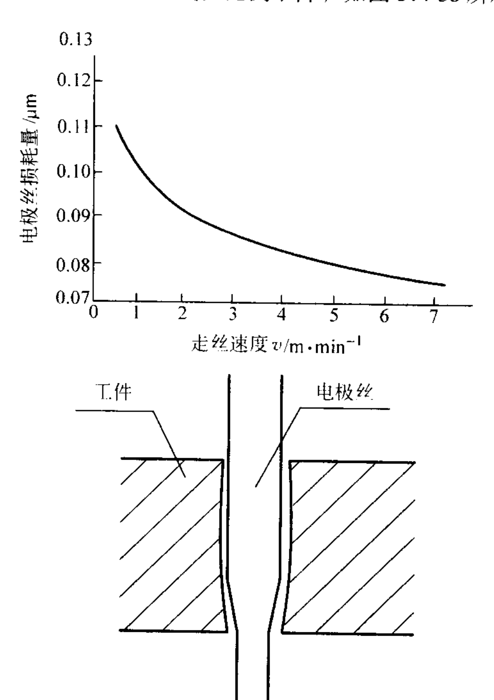


图 3.4-38 电极丝移动速度对电极丝损耗的影响



5.4　工作液

低速走丝电火花线切割加工主要是用去离子水作工作液，极间污染程度不仅会影响工艺效果，也会影响电极相对损耗。有人认为，电火花成型加工在煤油中加工，可以设法形成黑炭保护膜来降低电极损耗；而电火花线切割加工是在水基工作液加工，难于创造形成黑炭保护膜的条件，因而只能利用水质工作液在加工过程所形成的电化学现象和电喷镀现象来降低电极损耗。实验表明，加工过程中的电化学所发生的阳极溶解有助于提高切割速度和改善加工表面粗糙度。而阴极所发生的阴极电镀现象有助于补偿电极丝的损耗。实验还发现，加工过程所产生的电化学反应不仅会影响加工尺寸精度，而且会影响加工表面质量，所以许多制造商都开发了无电解电源，并获得了较好的工艺效果。

在高速走丝场合，由于电极是往返重复使用，电极损耗问题令人关心。高速走丝电火花线切割加工采用皂化油乳化液。如果用磷酸三钠作皂化油的稳定剂，则可以明显降低电极损耗（见图 3.4-39），而且用电子显微镜可以清楚看到，电极丝表面有电喷镀层。如果在乳化液中适当增加磷酸三钠比例，还会出现电极丝负损耗现象（如图 3.4-40）。但切割速度在负损耗现象出现时不仅不增加，反而会有所下降。现在不少从事线切割专用皂化液的生产厂商所生产的产品都在考虑使其产品更有利于提高加工效率的同时，还兼备使电极丝减少损耗的效果。

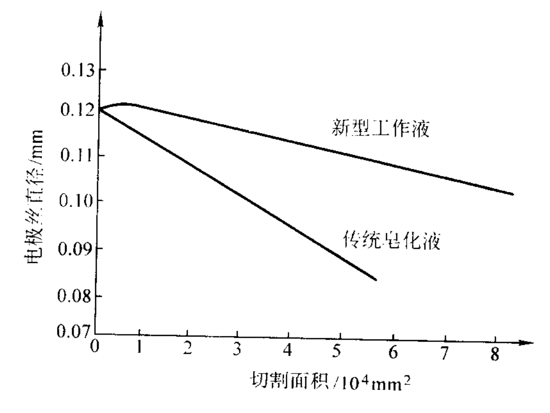


图 3.4-39　不同工作液的电极丝损耗

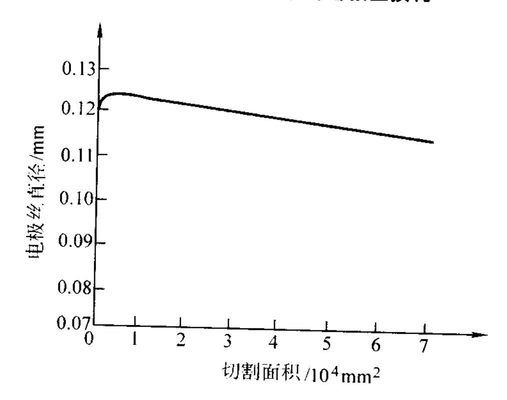


图 3.4-40　电极丝负损耗试验曲线

编写：杨晓欣（上海模具技术研究所）
　　　叶　军（苏州电加工机床研究所）



第5章　数控电火花线切割加工工艺及应用

1　基本工艺路线及工艺分析

1.1　线切割加工基本工艺路线及应用场合

数控电火花线切割加工的工艺路线如图3.5-1所示，可以大致分为如下四个步骤。

1）对工件图样进行审核及分析，并估算加工工时。

2）工艺准备，包括机床调整、工作液的选配，电极丝的选择及校正，工件准备等。

3）加工参数选择，包括脉冲参数及进给速度调节。

4）程序编制及控制介质制作。

电火花线切割加工完成之后，需根据要求进行表面处理，并检验其加工质量。

数控电火花线切割加工工艺方法已在我国得到广泛应用，并在制造业中尤其是在模具制造中发挥了重大作用，其应用领域主要在如下几个方面。

1）加工冲模，包括大、中、小型冲模的凸模、凹模、固定板、卸料板等。

2）加工粉末冶金模、镶拼型腔模、拉丝模、波纹板成型模、冷拔模等。

3）加工样板、成形刀具、电火花成形加工电极等。

4）加工微细孔、槽、窄缝，如异形孔、喷丝板、射流元件激光器件等的微孔窄缝以及微型零件。

5）加工和切割稀有贵重金属材料以及各种复杂零件等。

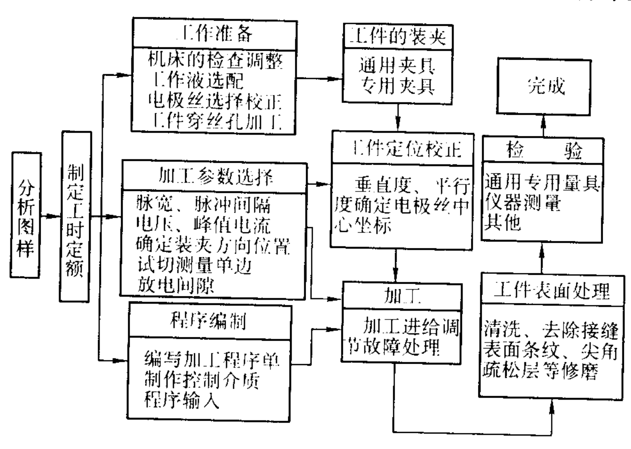


图3.5-1　数控电火花线切割加工工艺路线

1.2　零件图纸工艺分析

（1）线切割工序的合理性

线切割工序通常安排在工件材料经热处理之后，作为最后的加工工序。如果切割成形之后还要进行其他的加工，一定要考虑到是否会引起工件的变形或表面硬度、形状的改变。例如：对某些高灵敏度传感器、弹性元件、微细零件在线切割工序之后还要进行研磨、抛光等设计要求的后续处理，以进一步提高表面加工质量，消除显微裂纹、提高疲劳寿命。为保证这些后续加工能顺利进行，工件需要在线切割后仍保持一定的刚度，即先要将工件切割成封闭的形状，实施研磨、抛光后，再用线切割切成开放的形状。这就意味着必须将一个线切割工序分成两部分来做，中间要加入其他工序，才能满足最终的设计要求。

（2）工件材料和尺寸的要求

一般来说，绝缘材料和电阻大的材料不能被加工；导电性好的比导电性差的容易加工；淬火后硬材料比退火后软材料容易加工；黑色金属比有色金属容易加工。

在导电性方面，被加工的材料的电阻率应小于0.1 Ω·cm，同时在机械物理特性方面还必须适合装夹，如对材料硬度、刚度、塑性等方面的考虑。

对特殊材料的加工还要求其化学性能必须稳定，不会与水、氧和氢发生剧烈的化学反应，不可燃，不会在加工过程中产生有害气体。例如，对金属铍的加工，必须在绝对的安全生产条件下进行，保证对废气、废液、废渣排放的严格控制。

对于像玻璃、陶瓷这类无机材料在通常条件下是不能进行放电加工的，尽管有这样的研究报道：通过诱发放电等工艺措施可以对非金属材料进行切割，但与其他已知的加工方法相比效率还是低很多，暂时还不具备常规的应用价值。

对于常用的冷冲模具钢，有时会因锻造、热处理不当导致内部碳化物组织晶粒粗大，电阻分布不均匀而使加工不稳定、容易引起断丝。

对于硬质合金、导电陶瓷、聚晶金刚石等复合材料的加工，有时也会因所采用的黏结剂的导电性质、原材料晶粒的大小、合成中形成的新物相的组织结构不同，而使加工性能有很大的差异。

对于铝、钛等有色金属的加工，甚至完全不能按照加工钢的工艺参数进行。否则，像短路、进电块过度磨损、丝耗加剧、跟踪不好而导致断丝这类问题就会不断发生。

另外，工件尺寸的大小必须能够放入机床工作台内。将要加工的轮廓轨迹必须在加工范围内，而且适合装夹，不超过机床额定的最大负荷。当然，丝首先得能够自由穿过工件，要加工的表面必须是由一条运动的直线能够产生的。

（3）加工质量的要求

要满足零件加工质量的要求，首先应根据加工要求合理选用线切割机床的类型。

1）高速走丝电火花线切割机床一般能达到加工表面质量为：$R_a \geqslant 2.5$ μm，加工尺寸误差 $\Delta = \pm 0.01$ mm；凡加工要求类似于此范围者，都应首选高速走丝电火花线切割机床。因为此类机床加工过程消耗低，加工成本特别经济。

2）低速走丝电火花线切割机床的加工表面粗糙度为：$R_a \geqslant 0.5$ μm，加工尺寸误差都能控制在 ± 0.005 mm之内。所以，凡加工质量要求较高的零件，都应考虑选用低速走丝电火花线切割机床加工。

3）有不少零件，加工要求 $R_a = 0.5 \sim 1$ μm，加工尺寸误差 $\Delta < \pm 0.01 \sim 0.005$ mm，用普通的高速走丝电火花线切割机床难于达到，用精密低速走丝电火花线切割机床又感到加工费用太高。此时，可选用经济型的低速走丝电火花线切割机床或具有多次切割功能的高速走丝电火花线切割机床。

加工时，在保证加工表面质量要求的同时，还应兼顾切割速度。过分追求加工表面质量，会严重影响加工速度。表3.5-1所示的参数是低速走丝电火花线切割机床在切割70 mm厚的工件时，不同粗糙度要求下的切割速度。

表3.5-1　不同粗糙度要求下的加工速度

R_a/μm	0.45	0.6	0.8	2.0
v_s/mm²·min⁻¹	37	50	62	140



（4）加工速度的要求

与其他种类的加工相比，线切割加工的速度尽管在不断提升，但仍然很慢，使用者总是希望加工能进行得更快些。高速走丝线切割机床通常的加工速度在 20 ~ 100 mm²/min 之间，低速走丝线切割机床在 60 ~ 170 mm²/min 之间。速度上的差异，取决于对粗糙度与精度的不同要求，也和机床的不同生产年代、不同的加工对象、不同的机床品牌以及工件材料不同的机械物理特性甚至几何形状有关。

表 3.5-2　两类线切割机床加工不同厚度工件时切割速度对比

工件厚度	10 mm	20 mm	30 mm	50 mm	70 mm	100 mm
高速走丝线切割机	11/2.5	20/2.5	21/2.5	32/2.5	35/2.5	30/2.5
低速走丝线切割机	76/2.0	122/2.0	114/2.0	142/2.0	140/2.0	94/2.0

注：斜线前为切割速度，单位为 mm²/min；斜线后为 R_a，单位为 μm。

从表 3.5-2 可以看出，在粗糙度不变的情况下，最大的切割速度出现在工件厚度 50 ~ 70 mm 之间，在具备良好冲液的条件下，低速走丝线切割的速度要较高速走丝高得多，粗糙度也好一些。

在某些特殊的应用场合，需要机床以最大的加工速度来进行切割，而不考虑表面粗糙度以及变质层的厚度，如下料、直接切割出零件以及多次切割中的粗加工等。目前，高速走丝线切割机床的最大切割效率可以达到 150 mm²/min，而低速走丝线切割机床有的可以达到 500 mm²/min。但是，对于常规的冷冲模具来说，实际需要的并不一定是最大的切割速度，而是保证刃口质量前提下的综合加工速度。

（5）小圆角要求

线切割所能加工出的最小圆角，理论上等于丝的半径加上最后一次加工所包含的放电间隙，如图 3.5-2a 所示。最小圆角在这里指的是最小内圆角，对外圆角没有限制。

在编程时还要检查偏移量是否大于最小圆角半径，如图 3.5-2b。最大偏移量为丝的半径、各次加工余量和末次放电间隙之和，如果大于图纸上要求的最小半径，就会产生根切，伤及工件上的圆角。

丝的直径决定了所能够切割出的最小圆角，越细的丝能够加工出越小的内圆角。但是，细丝能够承受的加工电流要小得多，选择细丝的代价是大幅降低加工速度。所以，为解决含有大量圆角轮廓的加工速度问题，出现了这样两种实用方案。

1）在多次切割编程中，把每次切割的轮廓分开编程，每次都按最小圆角选取，如图 3.5-2c，以获得丝径可能达到的最小加工圆角。目前已有很多 CAM 软件经具备这种功能，能够自动生成具有相同圆角、不同偏移量的多次切割轨迹，避免人工改变圆角多次编程的麻烦。

2）利用机床自动化程度高或自动找正重复精度高的特点，采用两套送丝机构，用双丝来进行加工。粗加工用粗丝、精加工用细丝；用细丝可以获得更小的圆角，粗丝则兼顾了粗加工时的切割速度。

另外，由于电极丝存在柔性，在放电力的作用下产生弯曲，导致实际加工出的轮廓偏离理论轨迹，圆角半径越小误差越大，尤其是当工件的厚度加大了，误差会更加明显，如图 3.5-3 所示。

1.3　影响正常加工的主要因素

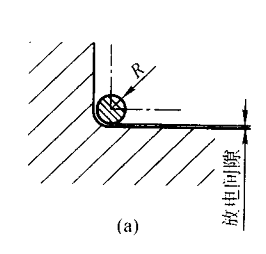
对于高速走丝线切割机床来说，阻碍加工的不利因素相对少些。但对那些切割面积大、路径长的工件，应充分考虑到丝的正常损耗、张力的改变对加工尺寸、位置精度有可能造成的影响，避免加工到最后出现轮廓不封口、位置精度误差过大等现象的发生。

阻碍低速走丝线切割机床加工的不利因素很多，事先有所了解、预防在先，有助于加工的顺利实施。对下列因素在加工前要充分了解到它的作用和将会产生的影响。

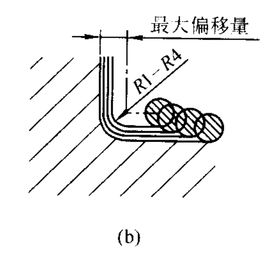
（1）工件形状对上下冲液压力的影响

当水嘴封不住大部分流量时，冲液压力就维持不住，直接导致注入间隙的介质流量的急剧减小，使放电不稳定，引起断丝。又如，当加工轮廓位于斜面上时，如图 3.5-4a。粗加工中过大的冲液压力作用在斜面上，所产生的侧向分力将丝推离正常轨迹，产生较大的误差，致使后续的精加工放电断断续续，不能将加工面完全修切出来。所以，加工前就要选择合适的水嘴，使工作液连续、集中、平稳地注入放电部位，如图 3.5-4b。同时，预先设定好上下水嘴的流量，减小由于工件表面不平或阶梯状对丝所产生的冲液的不良影响，如图 3.5-4c 所示。

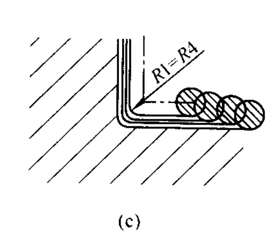
（2）切下的废料对丝垂直状态的影响



(a)

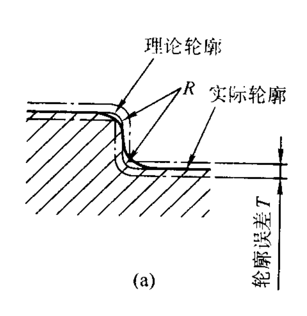


(b)

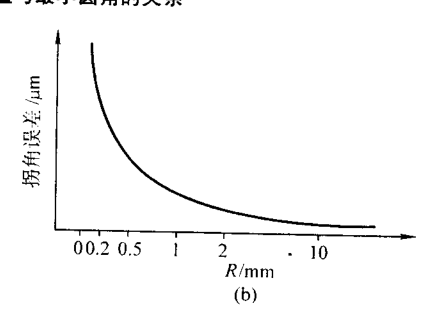


(c)

图 3.5-2　丝径、偏移量与最小圆角的关系

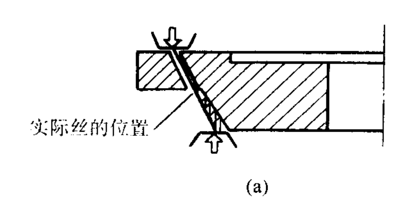


(a)

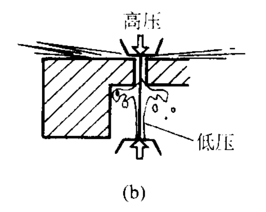


(b)

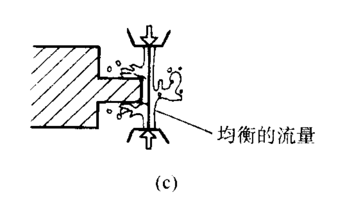
图 3.5-3　拐角误差与圆角半径 *R* 的关系



(a)

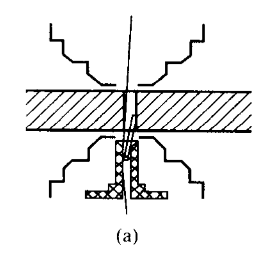


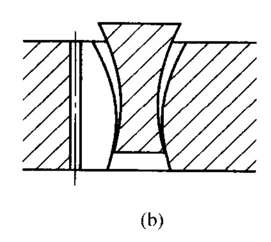
(b)



(c)

图 3.5-4 针对不同的工件形状的冲液方式


(a)


(b)

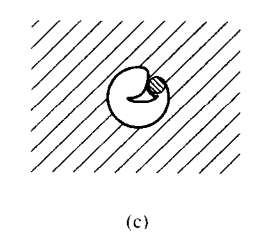

(c)

图 3.5-5 阻碍顺利加工的不利因素

编程时就要估计到加工中有没有废料掉下来，它可能会干扰正常放电，会伤及刃口，影响型孔位置精度等。

有些例外情况，在编程时很难察觉得到。比如，因穿丝孔打偏而使得一侧出现废料、另一侧完全被放电腐蚀掉。为避免这种意外，在加工此孔时可以将 Z 轴抬起，关闭上冲液、打开下冲液；废料一旦切掉，就会立即被水冲出来，不会对刃口造成任何损害。否则，就会如图 3.5-5a 所示，废料卡在水嘴里不被察觉，丝被别歪后继续加工，最终导致部分型孔甚至整块模板报废。

这种情况在有大量顶杆孔和导正钉孔的模板加工中会经常遇到，应予高度戒备。最简单的做法就是，提升 Z 轴，只用下冲液，损失一点切割速度来换取加工的可靠性。

(3) 工件自锁

对于上下异形或者截面形状相同但扭转了一个角度的工件，加工前应首先确认，工件是否能在加工完成之后取出，如图 3.5-5b。不管是有用的工件还是没用的废料，如果加工后取不出来，就必须改变编程方法或增加辅助切断程序。

(4) 材料变形，加工中出现短路

沿小孔边缘切割，或者是截面很小的凹模，有时会出现卷曲的“舌状”废料把丝卡住，形成短路以致使加工中断，如图 3.5-5c。尽管切割路径不长，但要排除这些短路却很花费时间。因此，编程时应先设计一段程序将其化掉，再按照轮廓进行正常切割。采用无废料切割工艺是一种常用的工艺方案，现在有很多 CAM 软件能自动生成这样的无芯化解程序。

1.4 工序安排

合理安排线切割工序，对于提高线切割加工生产效率具有重要意义。合理的工序能减少加工过程中的人为干预，避免因策划不当、对参数把握不准而带来的停机，可以充分发挥线切割机床自动加工的功能。

(1) 先易后难，自我确认

以多工位级进模具的模板加工为例，先从容易的、对误操作敏感度低的开始，比如先加工固定板，再加工凹模板，最后加工卸料板，这样操作者比较容易建立起信心。因为，对于用卸料板导向的级进模来说，它的重要性与模具上其他零件的关联度最大。如果上来就加工卸料板，对设定的偏移量与实际值之间的偏差把握不准，或者对机床的状态不清楚，一旦切出的型腔与凸模配合的间隙过大，这块模板就会彻底报废。相比之下对固定板要求的间隙就宽容得多，即便加工中有些失误也能挽回。

在同一块模板的加工过程中，也可以本着这种先易后难的原则。从简单的、容易在机测量的、公差带较宽的中小孔开始切割；在确认了设定的参数是正确的之后，便可以从容地完成后面所有型腔的加工。

(2) 充分利用自动穿丝功能，减少人的监视

使用带有自动穿丝功能的线切割机床，进行多型腔模板加工时，要根据型腔的大小来决定断口的留量，在无人看管的情况下不切断废料，加工到暂停点，自动剪丝后，走到下一个型腔继续加工，直至完成所有的型腔。然后，在有人监视的情况下，重新启动或调用程序，逐个切断并一一取出各自的废料。当全部废料取出之后，机床又能够自动进行后续所有型腔的再次或多次切割，恢复到无人监视状态。

断口的留量取决于型腔的大小和切断时的轨迹方向。废料自重产生的弯矩越大，断口应留得越长。有时，一个型腔可以分为几段，由不同的穿丝孔来引导，目的为了减少弯矩的不利影响，如图 3.5-6 所示。

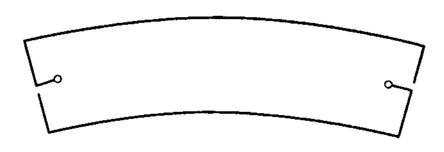


图 3.5-6 对大型腔进行分段加工

如果设计了专门的切断程序，穿好丝之后，就可以用最短路径，沿相反方向将废料切断，这时的断口保留 1 mm 长度或更短一些即可。如果顺着原有程序路径重新回到暂停点，就必须保证要切掉的废料与型腔之间必要的连接刚度，才能使切缝的宽度不会因材料变形而发生太大的变化，丝就可以在不带电或仅用弱规准加工至暂停点，等切断指令。

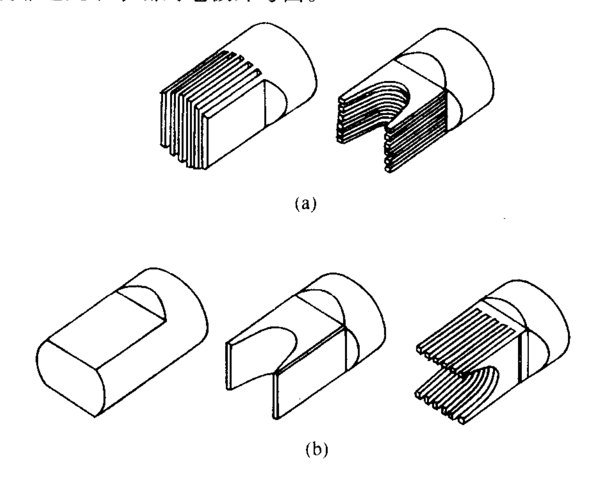
(3) 根据工艺特点，选择不同的加工排列

成批加工凸模或零件时，两种走丝形式的机床由于它们对冲液方式的依赖程度的不同，使得对加工顺序的排列有所不同。

高速走丝线切割加工中，由于不用过多地考虑冲液方式是否得当，加工顺序的排列显得无关紧要，如图 3.5-7a 所示散热器翅片电极的加工。先把一个方向做好，取出废料，再通过转动夹具 90°，完成另一个方向上的切割。

低速走丝线切割如果也像图 3.5-7a 那样来加工，就会有问题。在第一个方向上，切割会因上下水嘴（工作液喷嘴）与柱面之间封不住水，而丧失了压力冲液的条件，加工速度

会成倍地降低，尤其是对非浸液式的加工；在转动了 90°后的第二个方向上，同样不能实施高压冲液，因为压力过高会使靠近上下水嘴的电极片弯曲。



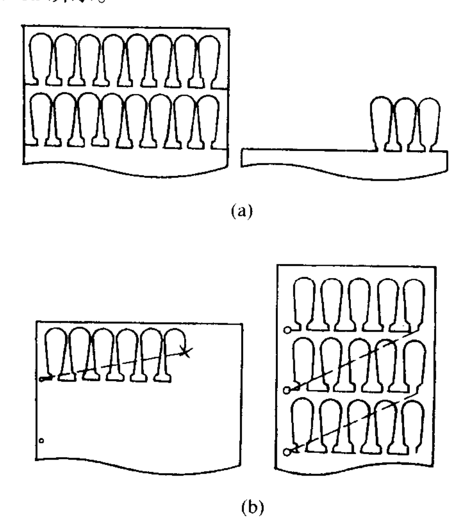
(a)

(b)

图 3.5-7　两类线切割机床采用的不同加工顺序

图 3.5-7b 是为适应低速走丝线切割对冲液条件的苛求而采取的加工顺序。在工件毛坯上先用其他工艺手段加工出一对平行表面，厚度比最终尺寸增加一个变形修正量和若干次修切的加工余量，在掉转 90°之后，这对平行表面无需用大电流再次粗切，也没有排屑问题。另外，为防止水嘴与工件发生碰撞，电极根部在铣加工时要向后多移出一段距离。这样的工件装夹好后，水嘴就能贴近工件表面，用上下冲液方式，先加工出带有弧形的轮廓，再加工出梳型轮廓，使得第一次切割就能用上较高的冲液压力，又不至于使高压冲液对第二次切割造成影响。

又如，成批加工消耗性的电机冲头。用高速走丝线切割可以加工一批，切断一批，最后用磨削的办法统一进行断口处理。如图 3.5-8a 所示。用带有自动穿丝的低速走丝线切割机床加工，务必不要使一组冲头的数量太多。因为，如果加工中排列的冲头数量太多，一旦中途出现断丝，就得回到起始点，重新穿丝后再次切割。由于材料变形、冲液的干扰作用，多次放电会对已加工好的冲头表面造成损伤，影响精度。所以，最好用小分组、多单元的方式来进行加工排列。如图 3.5-8b 所示。



(a)

(b)

图 3.5-8　两种不同冲头的加工排列

(4) 规模生产时，编程与加工作业分离

一人多机生产时，编程和加工作业必须加以分离，这样可以提高各自的专业技能，减少出错的概率。

(5) 提高机床无人化生产时的加工成功率

无人化生产时，尽可能选择轮廓简单、切割面积大、形状单一、具有一定批量的工件进行。对于复杂的级进模具的模板加工来说，如果上面的型孔小而多，每个轮廓的加工时间不长，最好是在有人监视的情况下完成第一遍的切割，取出所有的废料之后，再恢复到无人操作状态。

尽管也可以在每个轮廓上留下暂停点，最后在有人的情况下一并切断。但是，这样等于多增加了一次穿丝、上下水、启动、停止所需要的辅助时间，总的算下来未必省时。尤其是当工件上穿丝孔的位置有偏差，不能保证自动穿丝 100% 的成功，无人化加工过程被中断的事是经常发生的，从而导致了计划完成的时间后延，影响模具的交货期。

(6) 减少线切割的过度加工

既然线切割加工速度慢，那么零件上能用其他工艺完成的就尽量不用线切割，能用一次切割完成的就不用多次切割。

以凹模镶块为例，其外形既有精确的配合尺寸，又有很高的几何精度，用精密磨削的方式来获得比用线切割直接切出来效率要高得多。要保证型腔与外形有很高的位置精度，除了靠一次装夹同时加工出内外形外，还有很多其他的工艺方法也能实现，效率更高。

线切割断口应尽可能留在有对应平行面的表面上，便于用磨削方式来快速处理断口。

凹模型腔加工中，先切割出落料斜度，再用多次切割精修刃口，尽量减小精加工面积。

对同一轮廓上不需要多次切割的线段，宁可编程时麻烦些，改变一下修切时的轨迹，也不要对没用的线段作无谓的精加工。

(7) 压缩辅助时间

花费在线切割辅助时间上的主要作业有：装夹找正、程序读取、参数确认、废料取出、穿丝剪丝、液面升降、异常情况处理等等，其中装夹找正所用的时间最长。为减少装夹找正的时间，选择适用的夹具，在机外做好预先的调定工作，能大大提高线切割工序的生产效率。

(8) 加强对加工时间的预测与控制

根据切割轨迹的长度，在编程时就可以推算出总的加工时间。

对于高速走丝线切割机床来说，知道了总的时间，不仅能判定出在多长的时间内可以加工完毕，还可以估算电极丝的损耗对尺寸精度所产生的影响。

对于低速走丝线切割机床来说，了解总的加工时间还可用以作出如下判断：

1) 是否有足够的储丝量；

2) 各个加工任务之间在时间上的衔接；

3) 针对每项任务的工时分配合理性；

4) 在当前运行周期内对机床安排例行维护与必要的保养。

从而有利于对机床的工作状态监视、运行成本核算和模具工期控制等。

总之，任何影响加工周期的因素，都要认真分析，并加以控制。如果在加工策划阶段就能系统地并行地考虑上述有关问题，必然可以提高线切割加工的工作效率。

1.5　编程的工艺性

线切割加工能否顺利实施取决于编程的工艺性，下面列举的是编程时要注意的几个带有共性的问题，其中一些因素对低速走丝线切割机来说比高速走丝线切割更为敏感。

(1) 穿丝孔设置



凹模必须有穿丝孔才能开始进行切割，而凸模则不必。

高速走丝线切割通常不留穿丝孔，直接用一次切割来加工凸模，尽管有可能会出现图3.5-9a所示那种情况，但只要断口留得合适，最终的加工精度也能符合要求。

低速走丝线切割由于压力冲液的要求，一般情况下需要设置穿丝孔。穿丝孔直径与工件高度关系如图3.5-10，主要考虑到钻削时可能的长径比，如果用电火花小孔机加工，一种 $\phi2$ mm的电极就能满足所有厚度的工件。

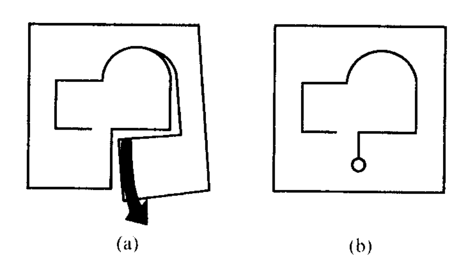


图3.5-9　穿丝孔的影响

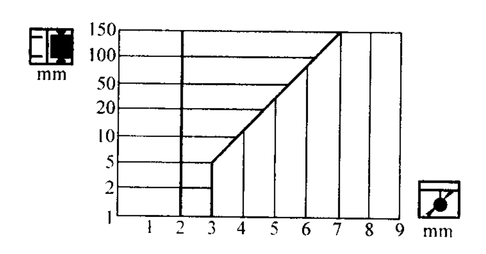


图3.5-10　穿丝孔直径与工件厚度的关系

(2) 引入切割的长度

引入切割是指在穿丝位置到轮廓切入点的这段路径上，用有别于轮廓上的放电规准所进行的一段特殊的加工。它的作用是为了给电源、冲液和伺服进给一个调整、适应、进入稳定加工状态的过渡时间。这种调节不论是手动还是自动，都是为了保证从最初的放电开始到后面的正常加工，既不断丝，又能保持比较高的加工效率，同时保证丝在切入点处的放电状态与整个轮廓上的放电状态一致，使最终的加工间隙保持恒定。

对于高速走丝线切割机床来说，对引入切割的需求仅局限于加工开始时的一段起步程序。此时在放电火花强烈的排斥作用下，工作液四处飞溅，保证不了放电区域冲液状态的连续。一旦丝全部切入工件，冲液状态就会变得非常稳定。不论工件的厚度有多高，通常有2~3 mm的引入切割距离就可以保证进入稳定的加工状态。如果考虑到更可靠的连接刚度，引入切割的长度可以适当增长一些。

对于低速走丝线切割机床来说，为保证最大的切割效率，通常引入切割的长度与工件的厚度有一定的比例关系，如图3.5-11所示。工件越厚，引入切割留的长度也越长。长度留量还取决于上下水嘴的直径和进轮廓后加工状态的稳定情况。水嘴的通径越大，越要加大引入切割长度，反之可以减小。当工件厚度大于70 mm时，有时为了避免压力泄漏，还可以采用图3.5-12所示的几种引入切割方式，目的都是为了保证获得良好的进入状态。

(3) 有配合要求的圆角

在没有特殊需要的情况下，不要设置 $R=0$ 的圆角去加工。因为，无论从加工还是从实用的角度出发，这种尖角几乎不可能加工得出来，使用过程中特别容易磨损或崩溃。一般情况下，编程时对所有未注圆角都默认为 $R=0.2$ mm，或自定义为更大些。

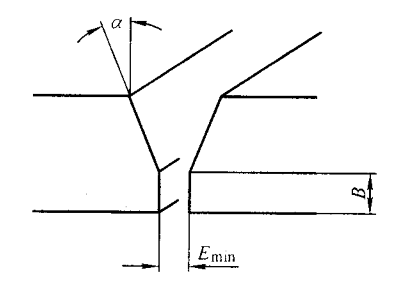


图3.5-11　引入长度与工件厚度的关系

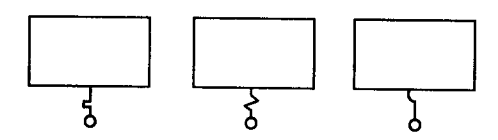


图3.5-12　几种不同的引入切割方式

图3.5-13清楚地表明拐角处的加工误差与 R 成反比，尤其是当 $R\leqslant0.5$ 时，如果没有特殊的加工对策，其误差会大到不可忽略的程度。由于线切割这一难以回避的固有缺陷，所以，在有配合要求的偶件加工中，往往因拐角处出现的问题最多，而影响到最终的配合性质。

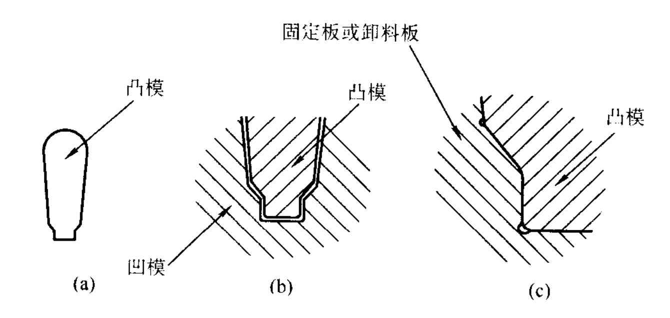


图3.5-13　避免圆角处出现过定位

解决的办法就是要减少圆角处配合的紧密程度或者让开，具体地要看需要什么样的配合要求。例如，对于冷冲模具来说，凸模上的圆角尽可能大些，这样既可以避免应力集中所导致的圆角处的过度磨损，又可以选用较粗的丝来进行效率更高的切割，如图3.5-13a。凹模上的圆角由凸模确定，在凸模原有内、外圆角的基础上相应地减小或增加一个冲裁间隙，如图3.5-13b。对于卸料板或固定板上所有的内圆角都可以允许产生根切；而上面的外圆角，只要在配合半径上大出凸模上相应圆角的0.02~0.05 mm即可，以不产生欠定位、避免过定位为准，如图3.5-13c。对于塑料模具来说，有意在圆角配合处让出0.02 mm的半径差，对镶件获得更加牢靠的配合是有利的，但要以不产生溢料、飞边为准，与材料的流动性和具体模具结构有关。

(4) 切割干涉检查

对于有斜度加工的型腔，在编程时要注意斜度与工件厚度的关联，避免在斜度加工中伤及刃口或其他有用部位，尤其是在最大斜度部位。所以，要确定最大斜度的角度和位置。对于变斜度加工，当角度比较大时，要重点关注拐角部位。一些高级编程软件都带有最大角度提示和干涉检查功能，帮助和提醒编程者避免发生干涉错误。

如果在带有落料斜度的凹模上有窄槽要切割，应对最小切缝 E_{min} 宽度进行检查。

在图3.5-14中，B 为刃口高度，α 为落料斜度，已知直壁切割时的切缝宽度为 S，则：

$$E_{min}=2(B\tan\alpha)+S \qquad (3.5\text{-}1)$$



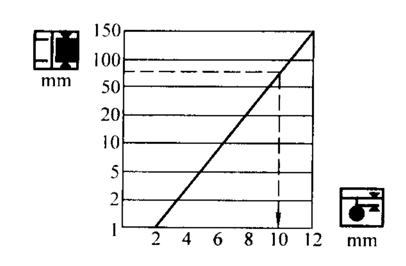


图 3.5-14 最小切缝宽度 E_{min} 检查

当两个有落料斜度的型腔相距很近时，有时为了避免背后切亏，需要核对一下相邻刃口之间的最窄间距 F_{min}（参见图 3.5-15）。

$$F_{min} = 2\tan\alpha(H - B) \qquad (3.5\text{-}2)$$

如果两边型腔的斜度不等，分别为 α_1 和 α_2 时，则：

$$F_{min} = (\tan\alpha_1 + \tan\alpha_2)(H - B) \qquad (3.5\text{-}3)$$

在某些特殊情况下，由于事先估计到两个型腔相距太近，加工中会有废料掉下来，需要对其大小心中有数，以便采取相应措施，这时就需要求解出 K、L 和 G，如图 3.5-16。

$$K = [2\tan\alpha(H - B)] - (J + 2S) \qquad (3.5\text{-}4)$$

或

$$K = [(\tan\alpha_1 + \tan\alpha_2)(H - B)] - (J + 2S) \qquad (3.5\text{-}5)$$

当 K 为负数时说明没有废料。

$$L = (H - B) - [(J + 2S)/2\tan\alpha] \qquad (3.5\text{-}6)$$

或

$$L = (H - B) - [(J + 2S)/(\tan\alpha_1 + \tan\alpha_2)] \qquad (3.5\text{-}7)$$

$$G = (H - B) - (J/2\tan\alpha) \qquad (3.5\text{-}8)$$

或

$$G = (H - B) - [J/(\tan\alpha_1 + \tan\alpha_2)] \qquad (3.5\text{-}9)$$

在实际编程时，往往无需如此计算，使用任何一种 CAD 软件都能通过几何求解得出结论。

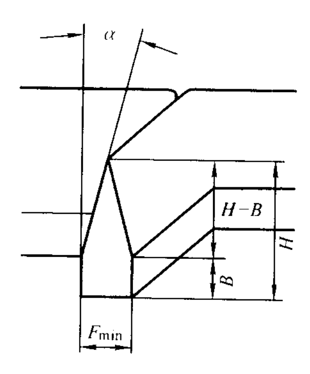


图 3.5-15 刃口最窄间距 F_{min} 检查

（5）预留断口

对凸模或零件外形编程时应妥善处理断口预留问题。

1）断口预留位置，使处理后的断口与相邻几何元素能平滑连接，相关尺寸容易控制。

2）断口留量大小，以保证既能衔接得好，又在去掉它时不费力、节省工时为准。

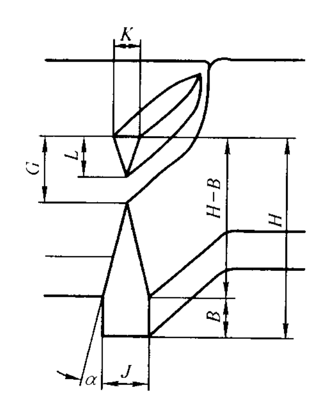


图 3.5-16 对废料尺寸 K、L 的估计

前面已经提到，如果凸模具备一定的刚度和一对平行面，最好把断口留在上面，用磨削的办法来处理。现在有很多编程软件采用人机对话方式来决定凸模断口的预留方式及留量。如果没有类似功能的软件，用手工编一样可以达到目的。要注意的是：断口长度最好设计成为一段整边，如图 3.5-17 所示。切入、切出轮廓采用圆角过渡，R 取 0.2 ~ 0.5 mm，并与轮廓上的圆角相切，磨削余量取 0.05 ~ 0.10 mm 为宜。这样，经磨削处理后的断口部分与轮廓上的圆角保持自然的过渡，尺寸和外观纹理都容易得到控制，尤其在批量加工时生产效率较高。

（6）凸凹嵌套的零件编程

这样的典型零件很多，比如凸凹模、齿轮及其刀具、挤出模口、电火花成形加工用的复合电极等等。其基本特征是相互嵌套的轮廓之间有很高的位置精度要求，甚至希望是越高越好。要实现这样的要求，除了取决于机床固有的定位精度、重复定位精度以及走丝系统的稳定性外，控制好加工过程中因材料变形引起的内外轮廓相对位移是保证位置精度的关键。

由于这类零件的外轮廓通常没有对应的平行面，甚至没有直边，完全由圆弧构成，有的还带有斜度。这就给断口处理、保证轮廓的连续增加了难度。因此，要求编程前先对可能发生的变形进行分析预测，然后再决定加工的步骤，最后编制出加工程序和实施细节。

通常的做法是：加工出外形后，先不切断；保持外形与毛坯有足够的连接刚度，然后加工出型腔。再将零件与毛坯粘牢，并在切缝中插入铜片，保证零件切断后仍与毛坯保持着良好的导电状态，以利于断口的修光。型腔是在外形先被切开后再被加工的，材料中的内应力得到有效的释放，使内外轮廓的相对位置精度得到提高。

如果这类零件采用低速走丝线切割机床来加工，甚至可以采取这样的工艺路线以进一步提高加工精度：外形粗加工（保持连接）；内轮廓粗、精加工；外形精加工（除连接处外）；粘接，保持良好的导电；连接部位的粗、精加工；取下完整零件。在后面的应用实例中将有详细说明。

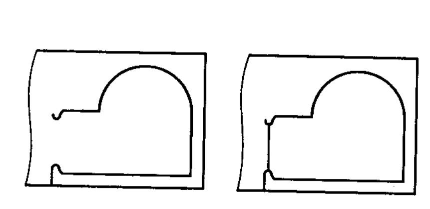
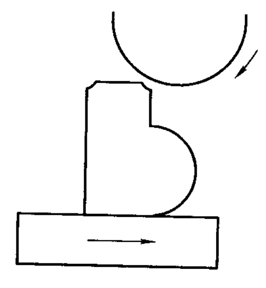
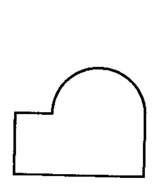




图 3.5-17 断口预留及常规处理办法

2 电火花线切割加工前的工艺准备

2.1 工件备料

(1) 材料内应力消除

未经回火时效的工件毛坯在切割过程中会产生较大的变形，严重地影响加工精度，甚至引起开裂，导致零件报废。所以，凡是经过淬火热处理后的工件毛坯都应该进行消除内应力的回火处理。例如：冷冲模具中常用的微变形钢Cr12MoV，通常需要根据不同毛坯厚度按 2～3 min/mm 的加热速率升至 230℃，再缓冷至室温，有条件的话接着进行低温处理，以使毛坯中的残余内应力降至最小。对于各种材料的回火工艺，请参阅有关的热处理手册。

一般来说，硬质合金类的粉末冶金材料内应力最小，淬火后的铬钢及合金工具钢其次，变形最大的是碳素工具钢。所以，在选择零件材料时，不但要考虑力学物理性能方面的要求，还要对残余内应力有所考虑。对有特殊精度要求的零件，甚至要优先选择热处理变形小的材料。

对于碳素工具钢的加工来说，残余应力不容易消除得很好，要防止出现较大的加工变形，还须在精加工之前安排一些用于释放应力的辅助加工或者留量较大的预加工，以减少加工变形带来的粗误差，使精加工前的加工余量尽可能均匀。图 3.5-18 就是为了减少大型工件加工过程中的变形而采取的两次加工方式。

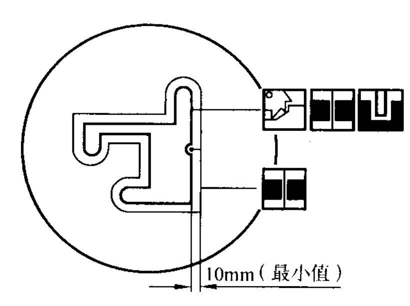


图 3.5-18 大型工件热处理前的预加工

图 3.5-19 所示的大型工件，为使芯部淬透，最好热处理前先进行预加工，预加工的方法可以用常规的金属切削，也可以用线切割或者电火花形来加工。热处理之后，再进行最后的线切割加工。

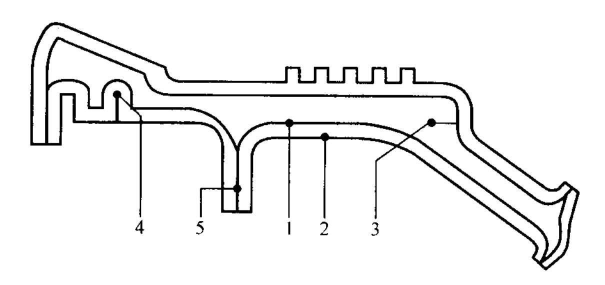


图 3.5-19 为减少变形分两次加工

由穿丝孔 3，沿轮廓 1 进行释放应力的粗加工，其中线段 5 也是为了使应力释放充分。再由穿丝孔 4 进入，对轮廓 2 进行最终的切割。

为二次切割预留的宽度要大于上下水嘴的通流半径，以保证在加工到轮廓的任何位置上冲液压力都不会泄漏，维持稳定放电。

图 3.5-20 是对工件先进行应力释放，再进行切割，以减少材料变形的影响。其中 1 为释放应力切割时的穿丝孔，2 为轮廓切割时用的穿丝孔。

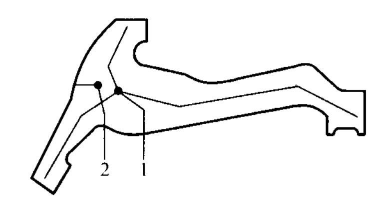


图 3.5-20 释放应力后再加工

对于刚性弱、热容量小的零件，还要避免加工中热影响所带来的新的变形。

(2) 基准的确定

工件的基准分为平面基准和位置基准，用来确定工件的相位和建立坐标系。有了这样的基准就可以确定工件相对于 $X-Y$ 导轨平面和丝的垂直状态、要加工的型腔的坐标位置。

平面基准通常是在磨削工序中完成，两面要求平行。位置基准可以是在前道工序中加工好的，也可以是在线切割工序中一并加工出来的，甚至就是工件上的某一定位销孔或型腔。具有良好的表面粗糙度和几何精度是对基准面的基本要求。

由于平面基准和位置基准通常要伴随着零件制造的全过程，甚至是零件的整个寿命周期。所以，对基准的加工、使用和保护就显得十分重要。加工简单、使用可靠、不易改变是对基准的总的要求。

常用的位置基准如图 3.5-21 所示。这些不同的基准定义方式适用于不同的工艺对象，有着各自的特点。

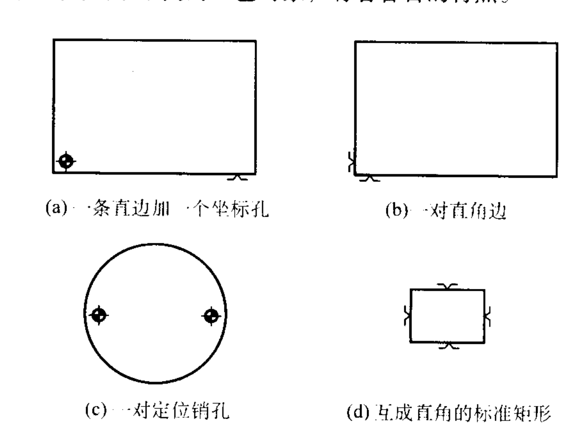


图 3.5-21 线切割常用的基准形式

1) 直边＋孔　大模板通常采用这种基准定义方式，直边用来确定相位，孔用来确定坐标。直边用磨削的方法加工成，并要求最好的直线度。孔做成 $\phi10$ 左右的沉孔，如图 3.5-21。有 3～5 mm 的直壁段并靠近平面基准；孔两端做 0.5×45°倒角，以保护孔的柱面，并使其与平面基准保持最好的垂直度；孔的圆度要小于 0.005 mm，表面粗糙度 $R_a0.4$ μm 以下。孔可以用坐标磨床直接加工出，或用镗－铣床精镗后，再精研出来。这样的基准孔可用于电极丝自动找中心，建立和恢复工件上的坐标系（图 3.5-22）。

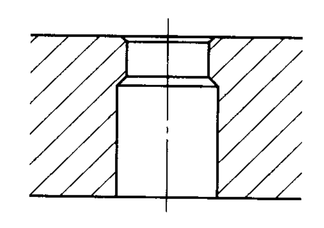


图 3.5-22 找正用孔



电极丝找中心是采取对称取中的识别方式，抵消了单向找正时的绝对感知误差。通常都要进行两次找正，以减少第一次找正前粗定位误差的影响。这种方式的找正精度高、重复性好。一般情况下，好的重复性应表现为：10次孔找中心，最大的坐标离散值应0.005 mm以内，做得好的机床总能控制在0.002～0.003 mm左右。

如果发现离散度很大，找正总是失败，就要检查孔壁是否清洁，要避免油渍、汗渍。有些机床在作接触找正时，要求不能有水，怕接触电阻与校正状态不一致。遇到这种情况可以用无水乙醇擦拭干净后，再来找正。

如果找正的离散度仍然很大，就需要进一步检查机床的重复定位精度、走丝系统稳定性以及张力波动的幅度。

基准孔也可以在开始时就做成与其他要加工的型腔一样的穿丝孔，与模板上的其他型孔一样用线切割加工出来。当然，这样加工出来的孔的精度要与零件的最终要求相匹配。一般来说，要按机床所能达到的最好水平来加工。

这种定义方式，除了要求机床自动找中心的重复性好之外，同时还要求孔壁光滑、厚度不宜过大，这样可以降低丝对孔轴线不平行的敏感程度，提高找正的可靠性。

另外，该种找正方式还可以用于超机床行程的串接加工。只要基准的几何精度高、机床自动找中心重复性好，小行程的机床同样可以加工出位置精度高的大模板。所以，在机床选型时确认这一功能实际所能达到的精度是十分必要的，它可以在需要的时候无需新的投资即可拓展加工范围，解燃眉之急，获取效益。

2）直角边　中小零件或模板常用这种方式来建立基准，它对设备的种类和精密程度要求低，直角边可用磨削获得。长边用来确定相位，直角用来确定坐标原点；靠丝碰边找正来建立坐标系。比起孔找中心，碰边找正的重复性要差一些，原因在于它依据的是单向接触感知的绝对精度，很容易受到工件材料的导电性、粗糙度、厚度、垂直度、丝的张力以及表面清洁程度等诸多因素的影响。

直角边基准的优点是加工简单，找正方便，可与前道工序共用同一基准。

3）定位孔　这种基准常用在小型单孔模具、复合模具以及整体式凹模镶件等结构上。工件上的一对定位孔通常也是与模板上的型腔一起切割出来的，既作为装配时的定位孔，又是今后模板修复时的找正基准。由于这种模板比较薄，又是在一次装夹中加工出来，所以一般不必再改成找正用的特殊沉孔（如图3.5-21），而是直接用来作基准孔，必要时孔两端予以倒角。

用在模板修复时，为了找正方便，要选择其中的一个孔作为编程时的起点。由这个点再自动走到要加工的位置上去。因为有可能通过两孔找正后建立起的坐标系不完全正交于机床的坐标轴，加工时需要旋转机床坐标与其重合。这时要注意机床在做坐标旋转时可执行的旋转角度需要精确到哪一个精度等级上，坐标旋转后的位置精度仍然要与正交时的相同。如果不习惯于这种做法或者为了简化操作起见，可在圆模板上加工出一条直边，用来确定相位，找正时会更方便些。通过自动找中心，可根据实际测量值恢复工件上原有的坐标系。

4）标准矩形　这种基准的特征是六面之间相互的平行度与垂直度很高。通常是用精密平口钳，通过磨削来实现。常用于精密冷冲模具上的硬质合金凹模镶块的加工，可以达到0.002/100 mm的几何精度。高质量的基准面，再加上采用对称找中，抵消了单向感知误差，使得用这种方式确定的基准具有良好的重复性和可信度。

在工艺图纸上最好将穿丝孔位置的标注尺寸以镶块的对称轴线为起点来标注，并把型腔的位置调整环放到外形上。调整量的大小取决于机床的找正精度、镶块加工的尺寸精度与几何精度。

一般来说，使用低速走丝线切割机床对这样的矩形镶块进行找正、加工，型腔相对于外形对称轴线的位置偏差能很好地控制在0.005 mm以内，应用于普通模具上，不设调整环也能满足大部分应用要求。

（3）预留装夹空间

工件装夹必须有可靠的定位，找正时易于微调，夹紧不产生附加应力，在高压冲液等外力作用下工件不发生松动；在加工过程中，内应力能够得到自然的释放，所产生的加工变形尽可能小地影响到零件的位置精度。

另外，夹持工件的夹具不能与机床的上下水嘴发生干涉碰撞，同时还要满足压力冲液的密封要求，保证理想的冲液效果。

工件在备料时要考虑到这些要求，合理的装夹方式可以避免很多意想不到的加工结果和机床事故。

（4）穿丝孔加工

与淬火之前在工件表面上用钻头钻孔相比，用电火花小孔机在淬火后的工件上打穿丝孔，无论是效率还是质量都要好得多，尤其是对多型腔级进模板的加工，既方便又可靠，是越来越被广泛应用的一种工艺方法。它的主要优点如下。

1）孔的几何精度与位置精度高，不受材料热处理状态的影响。

2）自动穿丝时导流好，成功率高。

3）孔壁光滑，无淬火后遗留的杂物，启动放电时不易发生短路。

4）在多型腔的模板上不易疏漏所有该加工的穿丝孔。

5）孔径小，冲液压力不会泄漏，启动放电后可以很快进入正常的大效率切割状态，节省了用弱规准进入切割的过渡时间。

6）特别适合加工细小型腔的穿丝孔。

7）是在硬质合金或超硬材料工件上加工穿丝孔的主要方法，甚至是唯一的方法。

8）加工小孔径穿丝孔时，不会出现钻头断在里面的情况。

如果只能在淬火前用钻床打孔，应注意以下几个问题。

1）热处理前，一定要保护好穿丝孔，避免孔壁过度氧化，尤其对于细小的穿丝孔。

2）热处理后，要将穿丝孔清理干净，保证丝切入时能正常放电。

3）对于大孔径的穿丝孔，引入切割长度要加大，使冲液压力稳定后，再进入大效率切割，减少断丝发生的可能性。

（5）材料与工艺标准化

建立企业内部的材料标准和规范化的作业程序，有助于简化日常大量的重复劳动，减少错误发生的概率，提高生产效率。

随着模具行业中标准件商品化程度的逐步提高，企业内部的材料标准有可能被社会化、商品化的模具标准件所替代。这样，对线切割来说工艺参数与工件材料的匹配程度会更好、更稳定，加工结果的离散性会更小，掌握线切割操作技术的门坎会进一步降低，企业的经济效益也会由此产生。

对于线切割加工中用量少的特殊材料，寻找专门的供应商来提供特殊供货，也是为了减少一些意外的加工失误。

因此，发现和选择好的模具标准件及其供应商并固定下来、建立和完善标准化的作业程序都是做好线切割工艺工作有关的方面，应予重视。

2.2 工件装夹

加工前，工件被合理而快捷地装夹是确保顺利加工和提高劳动生产率的有效途径，也是实现自动化生产的一个重要环节。围绕这一辅助工序，已经形成一个与线切割机床密切相关的专用附件的产品制造门类。因此，了解市场上已有的各种夹具系统的特点，选择适合自己加工对象的夹具，掌握工件正确装夹的基本原理和夹具的使用方法，有利于机床功能的最大的发挥。

(1) 对夹具的基本要求

定位和夹紧是各类夹具必备的基本功能，线切割夹具也不例外，只是由于加工中不像金属切削加工那样承受大的切削力，所以，一般来说，线切割夹具在使用时，欠定位的装夹情况比较多。施加的夹紧力的大小，也只是为了保证定位不受冲液压力以及加工过程中轻微外力的影响。

除此之外，线切割夹具还有一些特殊的要求，这些要求在市场上已有的夹具产品设计中都有具体体现。

1) 夹具中的定位、夹紧元件与工件的接触面积与露出高度要尽可能地窄和矮，避免过定位的发生。

2) 在一次装夹中，工件上的加工区域能全部覆盖，机床行走时上下水嘴不会与夹具碰撞。对低速走丝线切割机床的加工来说，一旦在加工过程中发现水嘴躲避不开夹具，就不得不拆下水嘴或抬起 Z 轴，冲液的设定压力就维持不住。在这种情况下，为了不断丝只有降低放电能量，以牺牲切割效率为代价。

3) 夹具能够灵活、自由地布置，以适应各种类型零件的装夹需要，尤其是那些对周边有加工要求或找正需要的工件。

4) 夹具上要有微调环节，使工件上基准边、基准面的找正作业容易进行。同时，这些微调环节必须具有足够的刚性，调定后自身不发生蠕变，不对工件造成新的附加应力；使用完毕后可复原，不造成永久变形，影响夹具的原始精度。

5) 夹具带有标准接口，能够进行机外的预先设定并与其他工序共享，还能够以最少的标准元件获得最丰富的组合形式。

6) 夹具材料采用不锈钢，以满足在水中的使用要求。常用的材料有 4Cr13、9Cr18 这类含铬量高的马氏体不锈钢，经真空淬火和冷处理后使夹具硬度达到 HRC50～55 后再经时效处理，使其具有良好耐磨性和稳定性。夹具上重要工作面的几何精度在精磨后通常不低于 0.005 mm，寿命不低于机床的使用年限。

(2) 不同类型的夹具

用于高速走丝线切割机床上的夹具种类不是很多，其主要原因是加工中不需要采用压力冲液，工作液由高速运行的丝带入加工区域即可维持正常的放电。因此，不用为了平衡冲液压力而将上下丝臂做得很粗，就能满足运丝对刚度的要求，而且水嘴也不必贴着工件很近。

通常情况下，在线切割工作台的台架上用一对横梁和几块压板构成的简单夹具系统就能满足大多数工件的装夹要求，丝可以很轻易地接近工件的边缘，完成各种作业。但是，这似乎意味着高速走丝线切割机床不需要好的夹具系统，问题在于与机床不成比例的夹具系统的市场价格，限制了它的普及和应用，致使人们普遍形成了这样的看法：先进的夹具系统不是为高速走丝线切割机床而设计的。下面的这些被广泛应用于低速走丝线切割机床的夹具类型，不乏可供在高速走丝线切割机床上借鉴应用的成分。

1) 压板类夹具（见图 3.5-23） 它的种类最多，适用于大多数工件的装夹。优点是结构简单、找正方便、易于维护。缺点是在机床行走过程中必须留意有可能与夹具发生的碰撞，工件上有足够的装夹位置，定位、夹紧部位以及周围不能加工到。

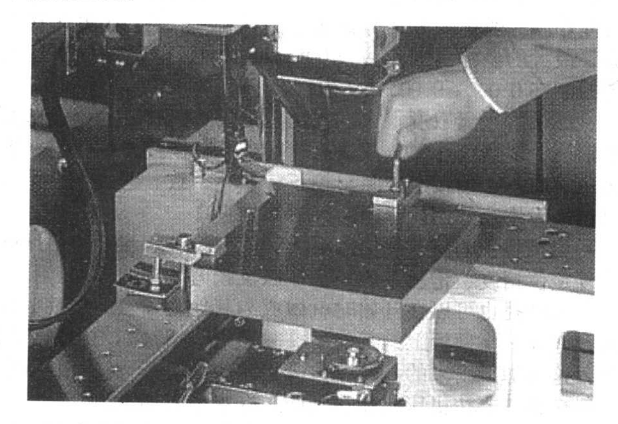


图 3.5-23 压板夹紧

2) 钳形夹具（见图 3.5-24） 最适合于小型工件的装夹，尤其是工件边缘有需要加工的部分，使用起来十分简便。如果工件的高度大于钳口的厚度，装夹后就不会有任何碰撞发生的可能，使作业变得轻松。适用该种方式装夹的工件必须保证在夹紧力方向上有一定的刚性，以免切空后出现变形。如果工件比钳口低，作业时同样要防止机床撞夹。

3) 框式夹具（图 3.5-25） 相当于大规格的钳形夹具，同样采取的是侧向夹紧的方式，与钳型夹具相比倾覆力矩小，可靠性高。通常由一组开挡不同、夹持高度不等的夹具组盒而成，以适应不同大小、厚薄的工件。

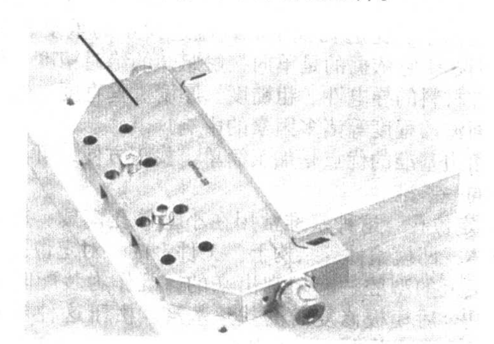


图 3.5-24 虎钳夹紧

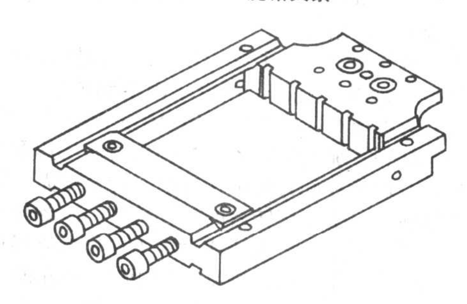


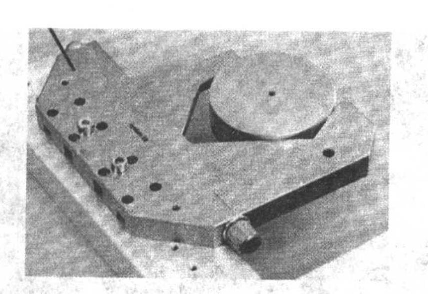
图 3.5-25 框式夹紧

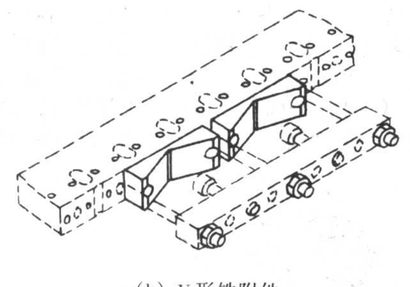
4) V 形夹具（参见图 3.5-26） 适用于各种圆柱形工件的装夹，其中又分成适用于夹盘类零件和轴类零件两种。小型盘类夹具及 V 形铁附件如图 3.5-26a、b 所示。

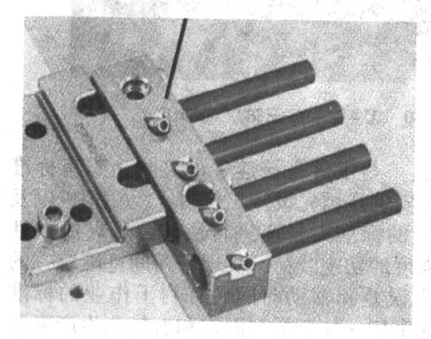
在轴类零件的装夹中又分水平装夹和垂直装夹两种不同形式，如图 3.5-26c、d、e 所示。

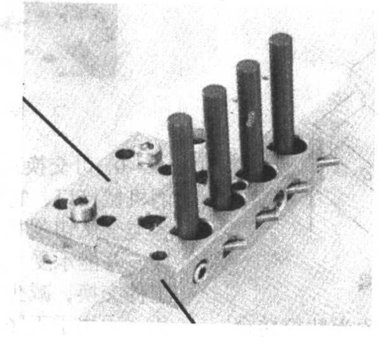
由于这类装夹方式是用工件的外圆为基准，因此，对外圆与端面的形位公差要求较严，尤其是相同的多个零件同时装夹时。另外，不适用于装夹大型盘类零件及太重的工件。




(a) 小型盘类夹具


(b) V形铁附件


(c) 轴类水平装夹


(d) 轴类垂直装夹

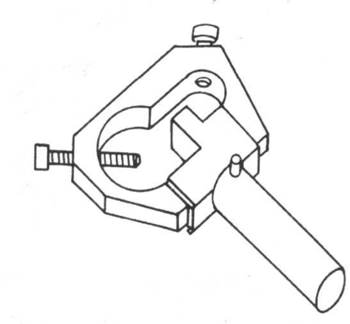

(e) 小型轴类零件夹头

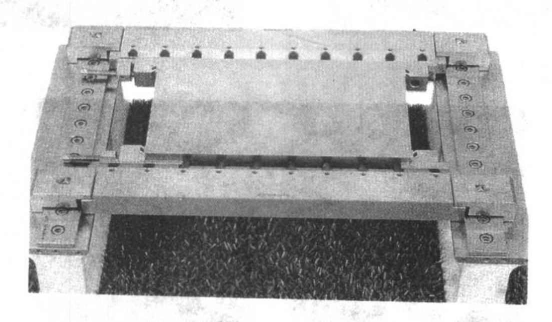
图 3.5-26 V形夹具

5) 桥式夹具（图 3.5-27） 这种夹具的制造难度比较大，价格高。因为在材料、热处理以及加工工艺等诸多环节上有着许多特殊的要求。

为了方便使用、减轻重量和拓展功能，这种夹具都被设计成具有多功能的基础件，既能适用于大件的装夹，又能搭载很多其他夹具附件，组成各种各样的装夹形式。

但是，在兼有大量的辅助功能的同时，对最常用的简单装夹与在机调微反而显得不那么得心应手。尤其是，当所夹持的工件又小又薄时，上水嘴无法贴近工件，高压冲液也难以实施；在快速进给中，机床很容易与夹具发生干涉，两条粗大的横梁常常挡住操作者的视线，如果横梁下有突起的承挡，又极易与下臂上的水嘴发生碰撞，加大了作业的紧张程度。

在没有其他夹具配套的情况下，单独靠一对桥型夹具，很难对小型工件实施精巧的装夹。所以，在夹具选型时，适用性与配套性一定要充分加以考虑。


(a) 采用侧向夹紧可避免碰撞

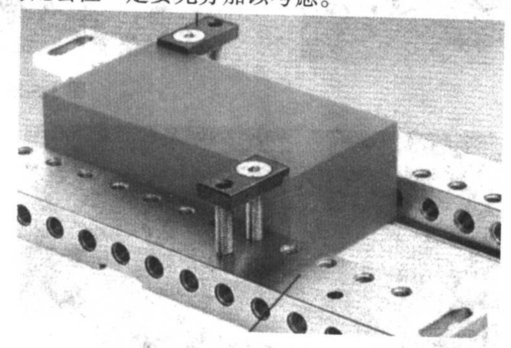
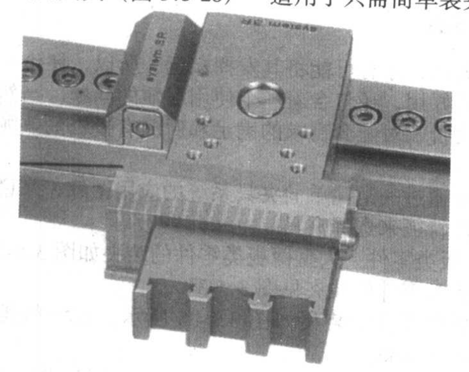

(b) 适用于承载较重的板类零件

图 3.5-27 桥式夹具

6) 磁力夹具（图 3.5-28） 适用于只需简单装夹即可实施修切加工的零件、微小零件以及特薄零件的弱规准加工。这些加工，在一般情况下不用较大的冲液压力，使用起来比较灵活。


图 3.5-28 带有永磁吸盘的磁力夹具

缺点是：工件材料必须导磁；不适用于板类零件的水平装夹；水嘴离工件远，不具备通常的压力冲液条件，不宜进行大效率的切割；当丝贴近磁铁放电时，还应考虑到磁场对丝的作用力，看其是否对加工精度有影响。

7) 万向夹具（图 3.5-29） 将几个带转轴的夹具组合起来使用，通过对两个转动自由度的独立调整，使工件获得所需要的空间姿态，再进行加工。主要用于一些切割角度超出机床斜度范围的特殊零件、刀具的加工，或者是有特殊角度要求的小批量零件生产。

在实际生产中，有时通过在夹具上设定好角度，用垂直状态的丝对工件进行简单的切割来获得所需要的空间角度，

要比3D编程后再加工容易操作得多，精度也容易得到保证，还能减少很多辅助工时，尤其是针对某些单件试制品，等于把线切割机床当磨床来使用，充分利用了线切割加工无切削力、热影响小、适用于弱刚性工件加工等特点。缺点是正常的压力冲液条件很难保证，粗加工效率会大大降低。

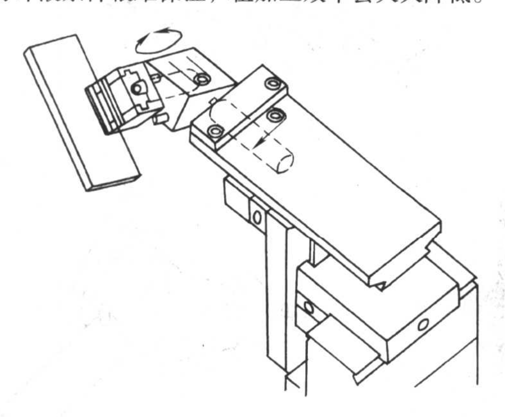


图 3.5-29　具有五个自由度的万向夹具

8）回转夹具（图3.5-30）　回转夹具也称为数控转台，可以作为 A、B 或 C 轴之一与已有的 X、Y 轴进行运动合成，用于加工各类内外圆、参数方程曲线、螺旋线构成的特殊曲面。无间隙转动、最小转角以及角重复精度是其主要的技术指标，通常由机床的生产厂家根据用户的要求作为特殊订货来配置。

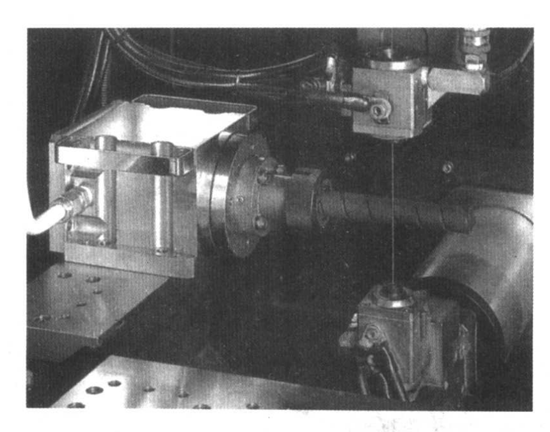
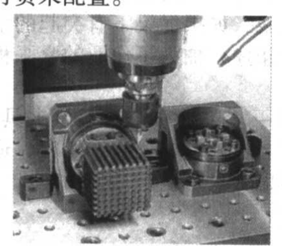
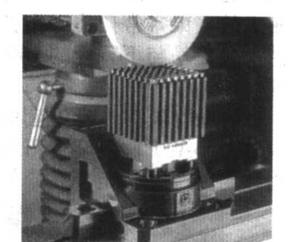


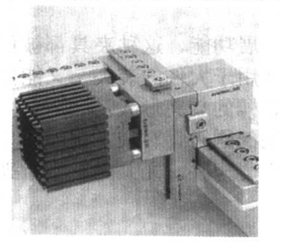
图 3.5-30　$X-Y-C$ 三轴展成加工

9）可交换式夹具　与工件直接连接的夹具上带有标准的机械接口，它能与安装在预先设定工作台、线切割机以及各类金属切削机床上的标准夹具座进行快速、可靠的刚性接，并能承受一定强度的切削载荷，实现工序间基准统一的工件交换，减少装夹误差和辅助时间，有利于作业的标准化。适用于工序关联密切、加工类型固定和有较高生产率要求的制造过程。参见图3.5-31。

10）整体式夹具（图3.5-32）　框形的机床工作台架就是夹具主体，工件可在台面上自由放置，确定后只需用压板夹紧即可。夹具的内侧边缘较薄，目的是为了让下臂上的水嘴尽可能接近夹具，以适应那些型腔距离边缘较窄的工件的装夹。







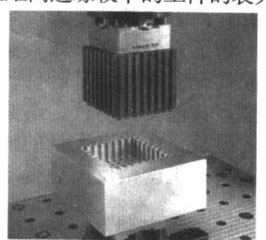
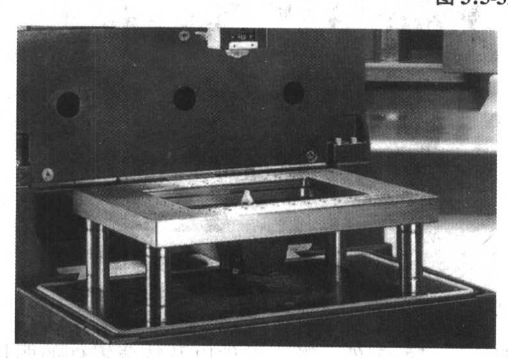


图 3.5-31　基准统一的多工序加工



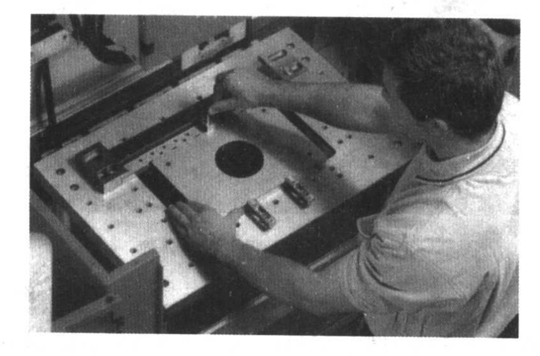


图 3.5-32　板类零件的简单装夹

这种夹具的最大优点是简单可靠、适用面广、承载能力强，对于大型板类零件的装夹十分便利，同时也易于搭载其他夹具来扩大应用范围。在电气方面大大增强了电缆连接的可靠性，提高了高频电流的传输效率。缺点是整块的不锈钢材料成本高，整体淬火困难，基体及表面硬度低，怕磕碰，没有微调环节，小型及窄边零件无法直接装夹。另外，机床须具备自动穿丝功能，并且要求工件自身的结构、穿丝孔的位置与大小适合于自动穿丝。否则，靠手动穿丝会感到十分不便，下不去手，框架也会妨碍视线。

（3）典型零件的装夹方式

无论采用什么样的夹具系统，都要能够应对各种典型零件的装夹，这是对夹具设计的基本要求。只有当使用者用惯了某种夹具，才有可能将其发挥极至。所以，评价一种夹具系统是否好用，还包含着一个使用习惯的问题。当然，还与投入的代价、对配套需求的满足和对已有投资的兼顾等因素有关。

下面通过一组简单的夹具系统的应用图解，来说明如何根据零件特征来选择夹具。

1）板类零件　大型薄板类零件的装夹如图3.5-33所示。小型薄板类零件的装夹见图3.5-34。

厚板类零件的装夹如图3.5-35所示。超厚板类零件的装夹见图3.5-36。

2）轴类零件　切割轴类零件的装夹方式如图3.5-37所示。



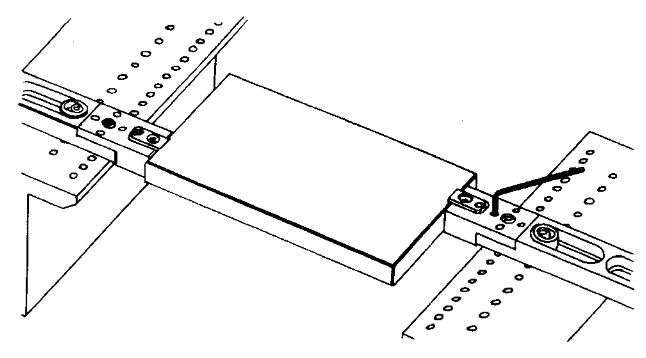


图 3.5-33 大型薄板类零件的装夹

3）盘类零件 切割盘类零件的装夹方式如图 3.5-38 所示。

在图 3.5-33～图 3.5-38 所示的各类零件切割装夹图解实例中，每件夹具上都有微调环节，微调通过端部的四颗顶丝来完成。顶丝呈正交分布，目的是为了保证运动的独立性，即一个方向上的微调对另一个方向的影响很小，因此，工件很容易找正，尤其是在机外预调时。当工件加工完毕，卸下来之后，务必要将顶丝全部放松，使端头复位，以备下次使用时，装夹面处于正确的起始状态，避免在接下来的作业中调过头。

用于机外预调的工作台如图 3.5-39 所示。

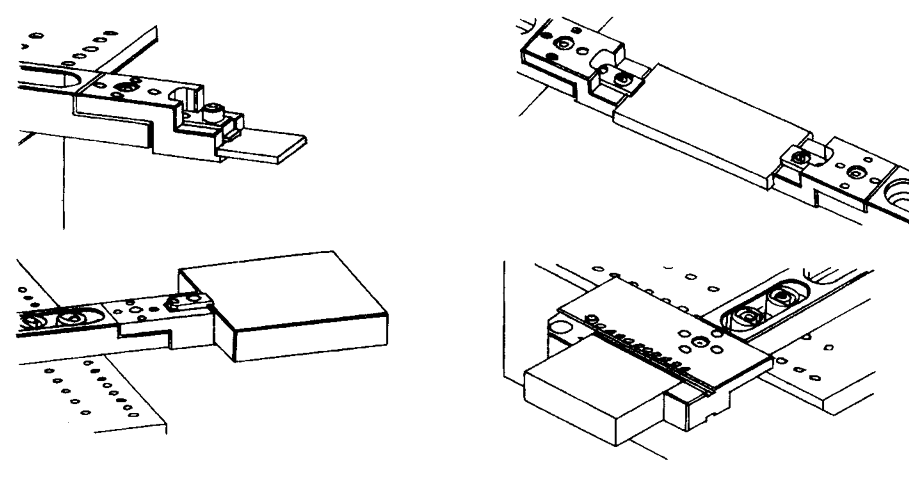


图 3.5-34 小型薄板类零件的装夹

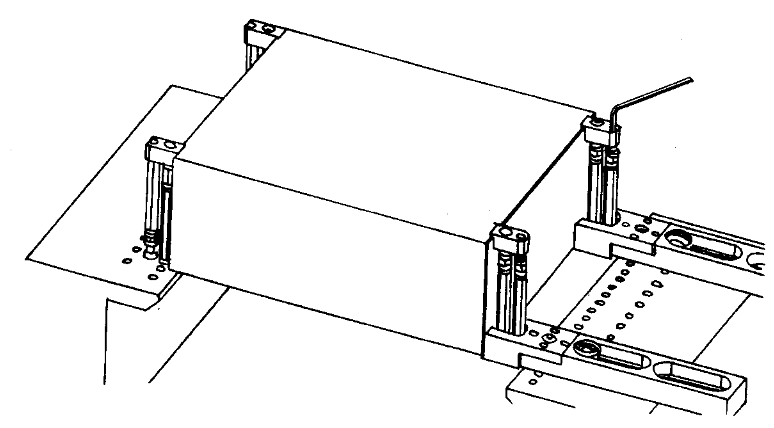


图 3.5-35 较厚板类零件的装夹

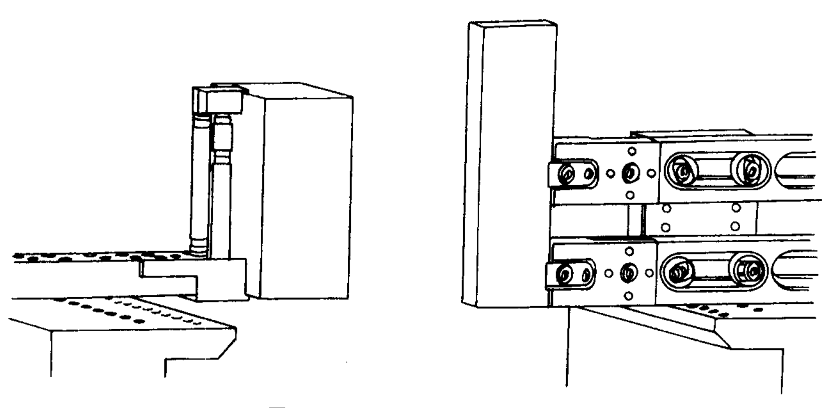


图 3.5-36 超厚板类零件的装夹



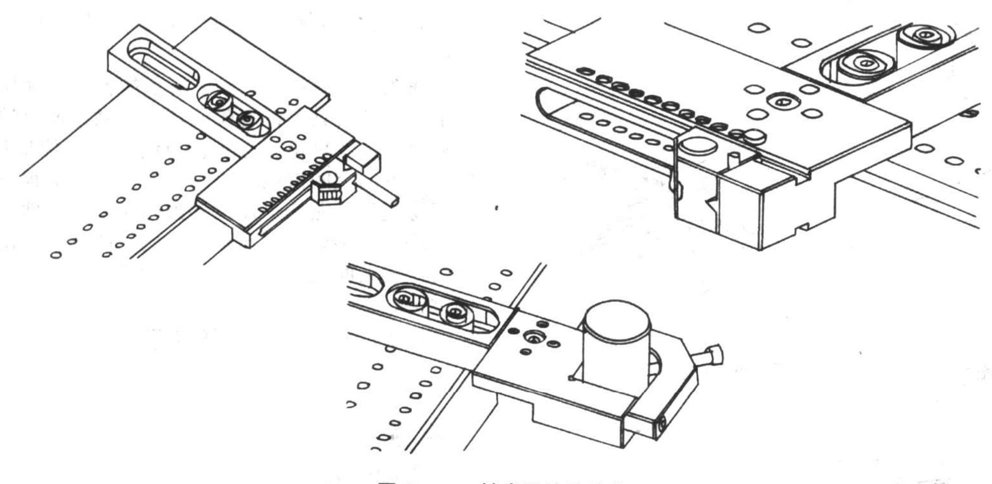
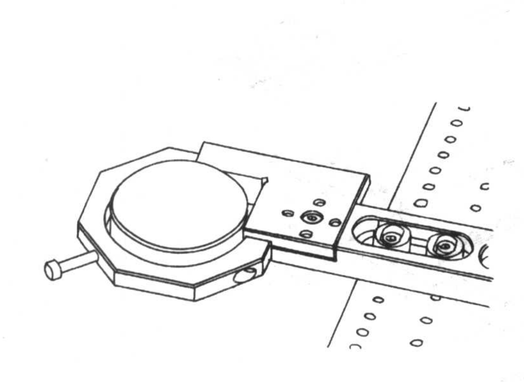


图 3.5-37 轴类零件的装夹



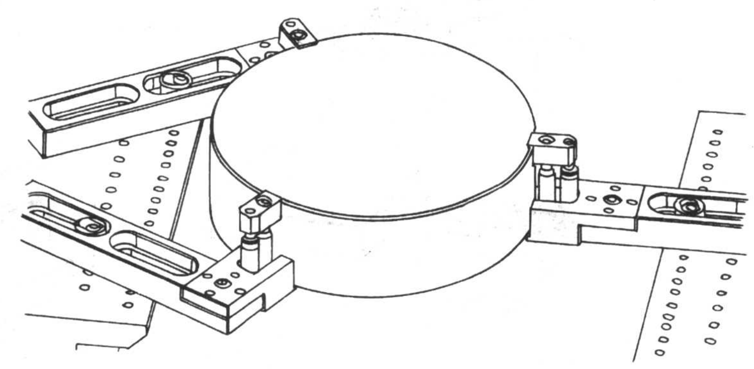


图 3.5-38 盘类零件的装夹

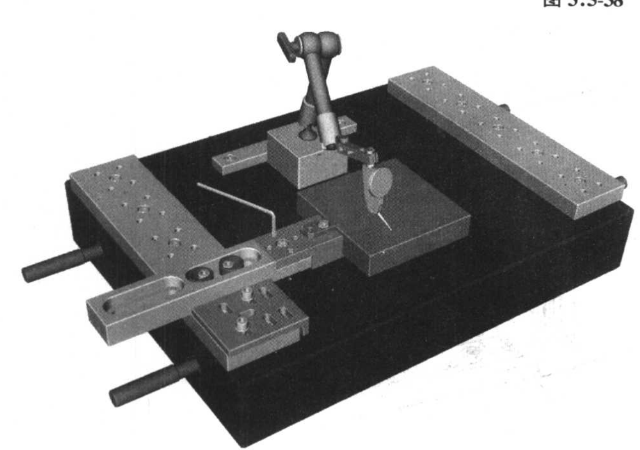


图 3.5-39 机外预调工作台

2.3 数控电火花线切割机床的调整

(1) 回机械原点

机床上的机械原点是坐标计数和误差补偿的起始点，是每个运动轴的位置基准。它的物理意义是精确、恒定、永远清不掉的坐标零点。低速走丝电火花线切割机床，一般由精密开关的触点或光栅尺、编码器上的固定参考点来实现，其重复精度在零点几微米到 1~2 μm 之间不等，与机床的等级有关；而高速走丝电火花线切割机床绝大多数都是在加工之前设定。

开机后首先应做回零检查。只有在做过机械坐标回零之后，机床才能够实现准确的误差补偿，消除有可能发生的错误补偿或系统偏差，获得最高的定位精度。

利用机械原点的这种特性，当所有重要的加工启动之前，务必记下起始点的机械坐标值，这样，万一系统发生故障、坐标丢失、使加工不得不中止时，便可以重新启动机床，依照记录下的机械坐标，准确地回到起始位置，恢复未完成的加工，就不会带来新的附加偏差，可信度很高。所以，操作者养成加工前记录机械坐标的作业习惯，加工中即使出现了意外的情况也能从容应对，挽回有可能出现的加工废品。

一般来说，断电后的机床在重新启动时，首先要回机械零点，然后再作其他的操作。在连续生产中，为了防止机床位置状态和工作状态的改变，通常不希望在空闲的时候，关掉机床上的所有电源，包括控制系统，只需将那些能耗大的外围设备关掉就可以了。因为热机状态对加工精度及稳定性是最为理想的环境。在湿度大的地方或季节，关机造成的冷热交变，会使电柜中线路板的绝缘性因灰尘变潮而下降。在长时间停机后再开机时，常常会引起新的、不可预测的电路故障和工作液循环回路的机械故障。

另外，在急停按钮按下后、软限位超出或行程开关被撞、伺服错误报警或轴运动错误报警后，都应该进行回机械零点的操作，以便系统正确地读取机床的误差补偿值。

(2) 校正丝垂直

校正电极丝的垂直状态是加工前必须确认的操作步骤。丝垂直校正的方法大都是与一个基准进行比较，使丝尽可能接近基准的垂直度。通常把这一基准装置叫做垂直找正器。

垂直找正器有多种结构形式，检测信号通过火花放电、接触显示或自动感知获得，再通过 $U-V$ 轴的位置调整来实现与基准的一致。

1) 火花放电校正　这是最简单、实用的一种找正方式。找正器就是一个平行度与垂直度小于 0.005 mm/100 mm 的精磨方块，由制造来保证。为了在找正过程中对火花放电的位

置识别起来比较容易，通常只保留靠近上下两端面 10 mm 左右的接触宽度，其余作空刀处理。如图 3.5-40 所示。

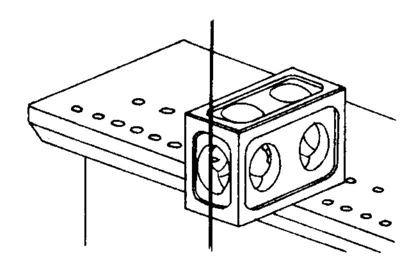


图 3.5-40　用火花放电校正丝垂直

另外，找正时，作业区域的光线要尽量暗一些；丝要运动起来，不加工作液，也不能让丝上带水；所选择的放电规准以能够识别出火花即可，不宜过大；两个方向上分别找好后，要再复核一遍，使找正精度进一步提高。这种找正方法的缺点是：判断接触火花的大小仅靠直觉，客观性不强，找正后的垂直度在 0.015 ~ 0.030 mm/100 mm 左右，精度低，而且放电火花会对找正器表面造成损伤，以致每次找正都要换新地方。

2）两点式接触找正　找正器由绝缘基座和上下端面上的两组呈正交排列的直线刀口组成，分别构成 $X-U$、$Y-V$ 两方向上的垂直基准，并成为接触信号的输出端。在制造上，要求上下两对刀口直线构成的平面分别与安装基面的垂直度小于 0.002/100 mm，粗糙度 R_a 0.10 μm。如图 3.5-41 所示。

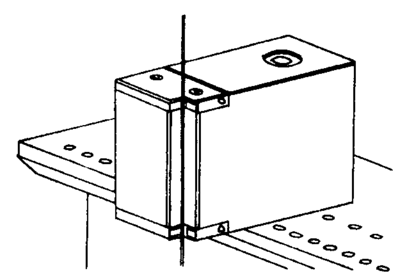


图 3.5-41　两点式接触找正器

找正时的动作顺序是：先做一个方向上的感知，比如 X 向。无论是接触显示还是自动感知，总会有一刀口先碰到丝；上端碰到了，则 U 轴回退、X 轴继续进给；下端碰到了，X 轴回退、U 进给；最终，上下两端同步逼近刀口，输出等值的接触电阻值或脉冲信号供接触指示灯显示或系统识别。当 X 方向的找正做完了，对于有自动识别功能的机床就会由程序转入另一个轴，以同样的方式进行找正，总共做两次。如果两次找正得到的数值相差较大就说明重复性差，找正不可靠，需要找出原因后重新进行。

常见的找正失败原因除了电气、机械方面的故障外，还有一些非故障因素导致找正不可靠。

① 找正器本身的垂直精度未经检定，不能确定是否可以作为基准来使用。

② 接触刀口不清洁，存在汗渍、油渍。

③ 走丝系统中，因送丝、收丝轮或皮带打滑引起的传动不稳定，导致丝抖动。

④ 丝与进电块、导轮、导向器紧密接触的表面摩擦状态改变而引起的张力波动。

⑤ 丝与找正器的接触电阻因其表面残留的水分未擦干净或者冲液不连续而出现阻值上的波动。

⑥ 找正时所用的进给速度太快，出现过冲。

⑦ 设定的两次找正的允差值太小，系统的重复性达不到。

⑧ 安装基面的平行度误差较大或安装得不平行，导致找正器自身不垂直。

当机床系统处于正常状态，以上这些影响因素都不存在，自动感知多次的重复性都在 0.002 ~ 0.003 mm 范围内，这种两点式的接触找正方法可以获得 0.004 ~ 0.008 mm/100 mm 垂直度，是比较理想和可靠的找正方法。

3）单孔式接触找正器　这是由一个可安装在机床上的支架和支架上的一片带圆孔的找正板组成。找正器本身并没有垂直度的要求，只要求找正板的固定面平行于支架的安装面就行，制造起来非常简单。孔的直径 ϕ20 mm，高度 1.5 mm，粗糙度 R_a0.20 μm。如图 3.5-42 所示。

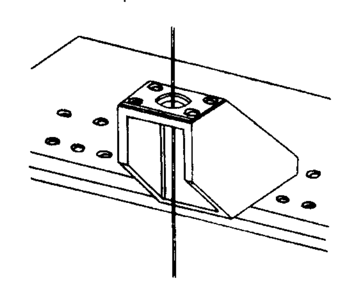


图 3.5-42　单孔式找正器

其工作原理是：将找正器固定在工作台上，丝穿入孔中，Z 轴降至找正器上表面后，启动找正程序。执行自动找中心，然后 Z 轴升起一段距离，再次执行自动找中心。系统根据两次找中心得到的坐标差值和 Z 轴起始坐标与圆孔中心高的坐标比例，计算出 $U-V$ 轴的移动量，加以修正。这样，反复几次使得 Z 轴的升降对找正后的中心坐标没有影响，即表明丝的垂直状态。

还有一种方法，用的也是同样的装置，但找垂直的路径不同。将丝穿入孔中，Z 轴下降，靠近找正器，先在 Y 方向上自动找正并取中，再朝 $+U$ 方向感知，取得数值后，回退一个定长；Z 轴升起一段距离，重新在 Y 方向上找正取中，然后，再次朝 $+U$ 方向感知，取得两次感知的差值。根据 Z 的坐标增量，即可算出 U 方向上的角度偏差并予以校正。用同样的方法，再进行 V 方向上的校正。丝的垂直状态经过一轮精化后，再重复一遍前述过程，即可获得较好的垂直精度。

这种找正方法的精度取决于 Z 轴的直线度、与 $X-Y$ 导轨平面的垂直度、找中心的重复精度和走丝系统的稳定性。其找正精度可以达到 0.010 mm/100 mm 左右。由于现在很多机床的 Z 轴驱动都采用直流或交流电机，升降速度很快，所以这种垂直找正的方法因其简单、可靠、易于操作而得到普遍的应用。

除火花放电找正之外，在其他找正方法中，如果是由机床自动完成，最好能够采用浸液的方式。这样做重复性好，找正速度快，机床更接近于加工时的状态。如果用的是非浸液式机床，就要保证找正时的冲液流量均匀，使检测信号输出平稳。

凡发生下列情况之一者，一般都要进行丝的垂直找正，才能保证加工的垂直度。

① 当机床系统重新设定后或 $U-V$ 轴回过机械原点后。

② 上下导轮、导向器、进电块、水嘴等与丝接触的元件进行过拆卸、更换及影响位置的调整。

③ 出现原因不明的加工误差，工件的垂直度变差或切出的角度不对。

④ 上下臂与工件或工作台发生过碰撞。

⑤ 加工结束时，$U-V$ 轴坐标显示不回零。

⑥ 重要的加工之前，对机床状态的确认。

(3) 建立坐标系

建立工件坐标系，以便确定各种加工位置，或者对已损坏的部分进行修复。可采用前面介绍的几种确定基准的方法来建立坐标系，并记录下加工起始点的机械坐标备用。

由于要用到接触感知来找出基准，所以要求工件表面必须是实体、致密而且光洁，无油、无锈、无毛刺，基准孔或基准边应垂直于基准平面。

为了提高自动找正的重复精度，接触面不宜过高，以免孔和边的不垂直导致尖点接触，增加找正的不确定性。大厚度工件采用接触找正的方法建立起的基准，准确度不会太高。

如果所加工的型腔相对于工件的位置精度要求很高，就需要增加采用其他方式的测量环节，间接找出的坐标，根据首次的加工结果再次进行修正。

对于那些必须采用 $\phi0.5$ 以下的穿丝孔、加工余量少、位置精度要求高的细小工件，往往需要在穿好丝后，使丝与穿丝孔之间留有均匀的间隙；启动加工时，既不发生短路、又能完整地加工出型腔，这时能否建立正确的坐标成为首要问题。

通常的做法是：加工前先在工具显微镜或其他量仪下测出穿丝孔与基准之间的距离，再装夹到机床上；用接触找正的方法建立坐标系后，再走到穿丝孔进行穿丝、加工。如果没有专用的测量设备，可以用一简单的瞄准显微镜直接安装在机床上，利用机床上的坐标显示，在机测量出工件上基准与穿丝孔之间的距离，再用丝去找正，获得准确或近似准确的穿丝位置。

工件上的坐标系建立后，有时为了避免加工中有可能出现的意外碰撞，尤其是在无人化的加工模式下，需要设置软限位，以限制机床的进给范围．通常给出对角线上的两个点的坐标来实现。当加工结束、取出工件后，应及时清除掉软限位设置，如不清除会导致后面新的其他加工非正常停止，干扰作业。

(4) 空运行

加工前的空运行其目的是为了校检程序，检查机床、水嘴是否会与工件、夹具发生碰撞，避免意外情况的发生。同时，观察加工是否超出行程范围，验证上下轮廓的正确性。这种空运行有时需要 *X*、*Y*、*U*、*V* 四轴按实际加工状态来运行，但更多的时候为了节省时间，只是进行 *XY* 两轴的快速运行，以检查干涉、校检坐标为主。

一般来说，对新的机床、夹具系统、初次操作以及非常重要或复杂的工件一定要进行空运行，以增进对各环节中不确定性因素的了解和认识。当对它们熟悉、掌握之后，就没有必要每次都进行空运行了。

(5) 线切割机床工作状态的确认

加工前，对机床当前的工作状态一定要有数，否则加工中出现了问题将无从分析，机床带病作业会使很多简单问题复杂化。下面的几个主要影响因素弄清楚了，可以避免工作中的盲目性。

1) 机床的精度状态　与最终加工精度结果相关的因素很多，采用排除法易于发现关键因素。对于新购置的机床无论是新的还是二手机，安装好后都要进行一次精度检定，在确认其所有精度值后记录备考，复检的依据是机床生产厂家提供的出厂精度检验单。

一般来说，线切割机床的几何精度不容易发生改变，除非机床在运输过程中遭受过剧烈的颠簸、碰撞，或者因铸件时效做得不好、机床地脚没有调正，造成床身的扭曲、变形。

在几何精度方面，应重点关注 *X*、*Y* 两轴在水平面内的直线度和相互之间的垂直度，这两项误差会直接影响到加工的位置精度。

机床的位置精度与各轴采用的丝杠、光栅的精度等级以及联机调试时进行的误差补偿水平有直接的关系，并对温度的变化梯度敏感。

对于行程大的机床，在作大尺寸的工件加工时，应使环境温度尽可能地接近测量时的温度，温度波动应控制在0.5℃/h 以内，昼夜温差≤3℃。为了在测量和加工中获得正确的补偿，开机后应先回各轴的机械原点或光栅尺上的参考点，使机床回到原始的补偿位置上，将修正值读入系统。机床的位置精度除了温度对它的影响比较大之外，在使用过程中通常不会发生突变。

重复定位精度是衡量线切割机床制造水平的一项关键技术指标，反映了在机床运动系统中所使用的传动件、结构件、光栅、编码器、驱动器等硬件的质量等级，也体现了设计、装配以及控制等软件和工艺环节的综合水平。精加工中，机床的跟踪响应、轮廓上精修余量的均匀性都与该项指标密切相关，它直接影响到工件精加工后的尺寸精度和表面质量，尤其是在对厚工件的多次切割时表现十分明显。

重复定位精度的变化是会随机床使用年限的增加而变大，但往往是渐变。如果发现该项指标突然增大，通常是由于机床受到过意外碰撞或者装配不当，造成传动间隙释放，以及传动副本身的质量问题而引起的非正常失效等原因引起。

由于重复定位精度的数值很小，通常只有几个微米，又是依据在全行程上经过多次往返测量的统计结果得出，所以，一般情况下，该项数值是由生产厂家在机床出厂前用激光干涉仪依照标准检测出来的，用户在没有同类检定仪器的情况下，很难复现相同的检测结果。

对重复定位精度有疑问的机床，最好采用高一个精度等级的计量仪器（诸如：激光干涉仪、节距规+测微计）来进行校验，以便对机床真实的精度状态有一个客观的评定。

在不具备上述计量条件的情况下，也可以利用重复精度好一点的杠杆千分表，在轴的不同位置上，测量一下机床微位移时，从正反两个方向上反映出的反向间隙大小，来间接地判断重复定位精度的好坏。

测量中，千分表显示的差值越小越好。最好在同一个测量点上重复测几次，以便消除表系自身的弹性变形，使读数更加准确、可信。在高、低速走丝两类不同的线切割机床上测出的经验值应分别小于 0.004 mm 和 0.002 mm，如果超出就很难复现机床出厂时的实际加工的工艺指标。

排除了轴运动方面的问题之后，剩下来对精度影响较大的就是走丝系统。在整个走丝系统中，需要加以确认的是这两个重要影响因素：丝在加工区域内的位置精度及其运动平稳性。

与丝位置精度有关的是丝的支撑元件，如导轮、导向器和进电块等。如果这些元件的状态异常或者支撑它们的零、部件刚性不足都会直接影响到丝的位置精度，尤其是在斜度加工中会表现得更加明显。出现诸如：放电不稳定、频繁断丝、斜度加工时轮廓不封闭、精加工速度不均匀、尺寸超差严重以及表面条纹不规则等现象。所以，加工前要对这些主要元件和零部件的精度以及装配情况进行检查，对有问题的零件要及时地进行更换、调整。

对高速走丝线切割机床来说，除了把主导轮的运动精度、预紧刚度和安装共面性作为重点加以确认之外，还要尽可能使丝在整个路径上受到的正反向阻力矩相等，以保证丝换向前、后的张力恒定，空间位置不发生改变。

对低速走丝线切割机床来说，导向器的过度磨损，无法对丝进行有效的限位，是造成丝位置精度波动的最直接原



因，调整或更换时，要严格按机床操作说明来做，确保每一步符合要求。

与丝运动平稳性有关的是丝的传动元件和张力机构，如丝筒、丝卷、过渡导轮、恒张力装置、传动皮带、送丝机构、收丝机构及其控制它们的软、硬件等。常见的问题有：加工不稳定，丝在运行中出现自激振荡，加工后的工件表面上存在明显的、不规则的条纹。可能的原因是：丝筒动平衡差，轴承失效，排丝运动方向与丝筒的轴线不平行，丝在丝筒上叠绕，运丝皮带打滑，运丝轮过度磨损，收、放丝控制电路偏离出厂时的调定状态。

对于高速走丝线切割机床来说，一般采用定性的方法判定丝的运动平稳性。比如目测，观察丝在空运行时最大弦高处的抖动情况；耳听，辨别导轮运转时声音是否异常；手感，体会运丝时丝臂的振动大小。采用轻惯量、动平衡精度高的丝筒有利于减小换向冲击和时间、降低噪声、改善丝的运动平稳性。

对于低速走丝线切割机床来说，可以采用定量的方法来进行检验。比如用张力计测试丝运行时张力的波动，不同的机床对张力的控制精度会有差异。可参考下列数据。

在正常情况下，实测出的张力值与设定值之间的允差应在 ± 5% 以内，张力的波动范围不应超过当前实测值的 ± 2.5%；对于 ϕ0.10 mm 以下的细丝，实测允差值可以放宽到 ± 7%，波动允许在 0.05 N 以内。

当走丝系统的结构刚性不是很好时，加工中改变张力的设定值，也会造成丝的位置变化，影响精加工时余量的均匀性，出现不该有的尺寸误差。所以，在高精度加工中要求丝的张力设定，自始至终采用同一量值，无论是粗切还是精修。

另外，如果张力是由电磁制动器产生，那么张力的设定调节必须延单方向进行，即丝一边运行、一边调整张力，由最小增至最大，直至目标值。若新的设定值大于原有值，在运行过程中直接增加即可；若小于原有值，则需先将设定值降至最小，再升至目标值，以消除磁滞影响，保证设定值的真实性。

2）检查辅助环节　加工中因辅助环节出现问题而导致加工中断或者停机是经常发生的事，尽管大多数事件可以恢复，不会使工件报废，但这些意外事件对生产周期的影响却不容忽视。如果事先给予一定的关注，完全可以防患于未然。

稳定的供电系统是数控机床正常工作的基本保障，± 10% 的电网电压波动对线切割机床来说是允许的，但如果超出这一范围就需要增加自动稳压器来维持正常的电压供给。对新增稳压器，也应纳入机床日常的检查、保养范围，因为由此带来的新问题也时有发生。例如：由于稳压器故障而引起的电压超调和瞬间跌落；在季节交替时节，空气开关上的接线端子会因温度交变发生松动，影响供电的可靠性。

对低速走丝线切割机床的某些特定环节，应定期地进行检查与保养。

① 水位情况　机床在水箱和工作液槽上布置了若干个浮子开关，用于监视不同区域的液面高度，为泵的安全运转提供保证，满足正常加工时清洁水的流量，保护精密机构不被水浸泡，发出顺序控制的回馈信号以及液面的报警信号。

需要检查浮子滑动是否顺畅？有没有开关动作？如粘有太多的污垢要擦净，避免浮子在导杆上滑动时被卡住，发挥不了应有的作用。每月应检查一次。

在正常的运行情况下，机床每天要蒸发掉 5 ~ 10 L 水。每次加工前要确认水位高度，不足的话要及时补充，以免加工因此中断。

② 水质情况　与水质情况密切相关的是过滤纸芯和离子交换树脂的处理能力。加工下来的蚀除物，除了一部分颗粒稍大的沉淀在水箱底部外，大部分会被纸芯过滤掉；而游离在水中的阴阳离子则由离子交换树脂来处理。

常用纸芯的过滤精度为 5 μm，表面积因纸芯的规格而不同，过滤能力由过滤器的压力表来显示，或由压力传感器侦测后自动显示。

图 3.5-43 说明过滤器中的压力与剩余加工时间的关系。如果所有剩余工时全都用来作粗加工的话，蚀除物多，纸芯的使用寿命就很短；正常的多次切割，蚀除物少，持续的使用时间明显加长。对于不同的机床，只要平时留心积累，都能做出同样适用的参考图表，因为工作原理是一样的。

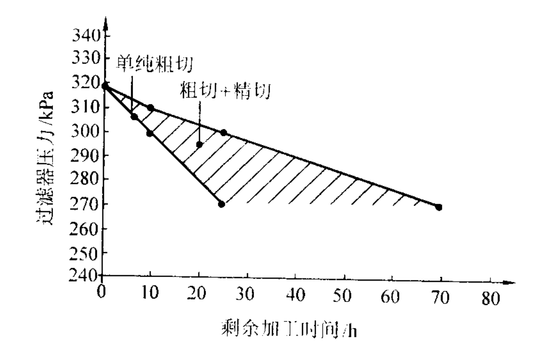


图 3.5-43　过滤器中压力与剩余加工时间的关系

水的导电率要求小于 10 μS/cm，当水路中的传感器侦测出水的实际导电率大于该设定值时，机床自动打开离子交换回路，水流经交换树脂变为导电率很低的高纯水，与清洁水箱中的水混合使总的导电率下降，当到达设定值时，交换回路关闭。当树脂逐渐失去交换能力后，便不能使升高的导电率降低，这时就需要更换新的离子交换树脂。

树脂的工作寿命是有限的，例如 10 L 某牌号的树脂可以维持 100 h 的放电时间，使导电率稳定在 10 μS/cm 以内。要提高树脂寿命，可以从这几个方面入手。

a）进入离子交换回路的水必须是经过过滤的清洁水，如果因过滤器破损使大量脏水流经树脂筒，会使树脂表面迅速被污物包裹而失去交换能力。所以，过滤精度对树脂寿命也会有影响。另外，水流在流经树脂筒时，不应存在死区，能让所有的树脂都参与交换。

b）保持电导率测头的清洁，使测量回路不受干扰，可以减少离子交换误动作的次数。因为不必要的离子交换会导致制备多余的高纯水，而高纯水暴露在空气当中，极容易使空气中的二氧化碳溶入，使导电率升高，无为地消耗树脂的交换能力。

c）机床不工作时应关闭水循环回路，减少水与空气的接触和蒸发量。

d）尽量采用蒸馏水或导电率小于 10 μS/cm 纯净水来补充水量的减少，不用机床上的交换装置来处理新增超标水量，以延长树脂寿命。

e）要禁止盐类物质进入水系统，氯离子对交换树脂的活性来说是致命的。硬水地区绝不能将自来水不经处理直接加入水箱，否则有可能新补充进来的水还没有处理完，树脂就已经中毒失效。

f）开封后的树脂最好一次用完，如果用不完也要妥善保管，保持湿润并与空气隔绝，一旦放干，树脂便失去离子交换的活性。

③ 压缩空气情况　机床上有很多用于执行顺序动作的气动元件，为保证动作到位，要控制进入系统的压缩空气的工作压力在机床要求的额定范围之内。工作中意外的气压跌落，都会导致停机，所以加工前要确认气源的状态。

④ 密封情况　新一代机床的浸液式工作液槽都有一个与下臂的机械动密封问题，在保证不泄漏或微泄漏的前提下，应尽可能减小动密封结合面上的摩擦阻力，对此进行定期的擦拭与保养是必不可少的。否则，会因摩擦阻力变大导致机床爬行，直接影响机床的重复定位精度。尤其是对于闭环驱动系统，爬行是导致振荡的一个主要原因。

⑤ 丝的情况　首先，丝的力学物理性能应符合使用要求。从丝的外观上也可以判别其拉制质量：丝在自然垂放的状态下，每米长度上不应超过一个弯儿，弦高与弦长的比例1:10，弯曲的半径太小会影响自动穿丝的可靠性。

有些机床需要将丝的长度数值键入系统，用来监视剩余的加工时间；当长度计数为零时，机床自动停止加工。所以，加工前要看一下丝的剩余长度是否够本次加工使用。

其次，还要检查一下废丝的容纳空间够不够。当废丝箱快要满时，不断加工下来的废丝会无规律地乱跑，容易引起短路，导致加工中断。

在清理废丝时，一定要防止凌乱的丝触及任何有可能的电气设备上的接线端子，引发人身安全事故。当机床背后空间狭小，同时周围设备拥挤且情况不明时，最好先断电、后清理。

3）环境因素　振动、热辐射、温度陡变都是影响加工的不良环境因素，事先必须予以消除。

另一个对数控系统影响比较大的因素就是机床接地的可靠性，如果不能确认，或者根本就没有独立的地线，机床运行时很可能出现诸如死机、轨迹错误、非法操作等致命错误。所以，当加工中时常出现原因不明的死机现象时，应首先检查机床的接地可靠性。

2.4　加工参数设置与调整

（1）偏移量的确定

由于丝的直径和放电间隙的存在，在加工中，丝的运动轨迹必须偏离理论值一段距离，才能保证加工结果符合设计要求。另外，模具需要在不同的模板上根据相同的轮廓加工出不同间隙的型腔。按理论轨迹编程，通过直接修改偏移量来满足这一要求，是最为常用、快捷和准确的方法。

对于高速走丝线切割加工来说，偏移量取值通常为丝的半径再加上0.01 mm的放电间隙，比较固定。间隙虽受加工规准、工作液状态以及工件材料等物理因素影响，但在编程时一般都设定为一个固定值。偏移量的更改也主要是为了弥补较长时间的加工后，正常损耗所导致丝径的减小。

对于低速走丝线切割加工来说，加工规准、冲液状态、工件材料、多次切割时的预留量，以至放电时的热影响都会对偏移量的设置起作用。很多标准加工状态下的偏移量，在机床的使用手册上都有明确的数值，可以直接遵循。表3.5-3是低速走丝电火花线切割机进行四次切割的偏移量，所用的黄铜丝直径 ϕ0.25 mm，工件材料为厚度 50 mm 的Cr12。

表 3.5-3　ϕ0.25 黄铜丝，工件材料：Cr12，50 mm，四次切割时的偏移量

切割次数	偏移量/mm	加工余量+放电间隙/mm	蚀除量/mm	R_a/μm
1	0.242	0.117	0.342	2.0
2	0.172	0.052	0.065	1.5
3	0.147	0.022	0.030	1.0
4	0.137	0.012	0.010	0.6

需要指出的是，本书的设定值只是一种有效的参考，并不能满足所有的加工需求，替代人们在工艺上的不断探索与创新。因为，有许多变动因素导致了实际加工结果与标准状态不符：新旧机床在脉冲电源输出回路上不同的传输损耗；不同的工件材料及内应力分布引起的伺服状态改变；工作液电导率与冲液压力偏离校正状态；差异很大的几何形状；不同的电极丝质量、丝的路径上因摩擦阻力变化而导致张力的改变；诸如此类。

在多次切割中，最后一次修切的偏移量决定了零件最终的尺寸与表面粗糙度，但是先前加工中所使用的偏移量也会对此产生间接的影响，消除“误差复映”是制定多次切割中各挡加工余量的主要依据，也是平衡速度与质量的砝码。

随着多次切割修充次数的增加、放电能量的降低，在工件尺寸接近最终要求的同时，表面粗糙度也会明显地改善许多；如果表面质量变好了，尺寸精度反而变差的话，就要考虑到余量留得是否合适。尤其是当工件的高度比较大时，精加工余量选择不当、上一遍加工中留下的形状误差偏大或是不均匀、甚至只有几个微米的差异，都会导致最终的尺寸精度恶化。规准越弱对加工余量的大小、分布的均匀程度越敏感。

所以，对重要的高大零件，在加工之前一定要确认各次切割中选用的偏移量是否合适，不单单是遵循使用说明书，一定要有经过验证的数据，否则，在实际的加工中很可能出现意想不到的问题，比如在工件表面上留下无法去除的深沟条纹或者母线的直线度不好，影响到最终的加工质量。

（2）对斜度加工的预先估计

有加工斜度要求的工件，其斜度大体上有两种：轮廓上的斜度和落料斜度。轮廓上的斜度是编程时按设计要求制定的，不论是在哪一遍切割中角度值都是一样，要求准确的程度比较高；而落料斜度可以是事先编好的，也可以是临时在机设定的，犹如偏移量的设定一样，依照直壁轮廓给出一个固定的角度值，在每遍的切割中这一角度可以设置成相同的值，也可以是不同的值。

例如，在冷冲模具中使用同一个程序对凹模板上的刃口斜度和落料斜度选取不同的角度来进行加工，即采用双后角的结构形式，如图 3.5-44 所示。

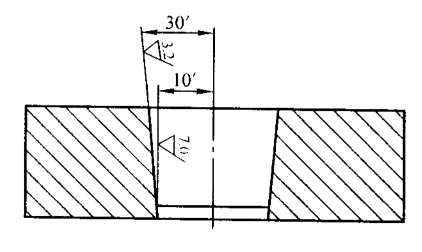


图 3.5-44　双后角凹模

一种常用的工艺手法，其优点是既能满足刃口多次重磨的需要，又能保证废料顺序下落，使之不产生翻转，堵塞凹模，还增强了刃口的承载能力，延长模具使用寿命。

与直壁切割相比，斜度加工中对精度的影响因素增多了，如果事先对这些因素有充分的估计和采取相应的措施，对提高斜度加工的精度会很有帮助。

在高速走丝线切割的斜度加工中，丝在导轮 V 形槽上的切点是变化着的，如果控制软件没有对这种变化作出相应的补偿或者补偿不当的话，都会影响到最终的角精度，而且切割的斜度越大，加工误差也就越大。

配备着随动连杆机构的线切割机床，在进行斜度加工时，不存在上述丝在导轮上切点改变的问题。因此，更适合于大斜度的加工。但机构中过多的活动关节和刚度不高的连杆机构，降低了丝在加工过程中的重复精度。当关节处的运动副预紧不足或者预紧过度时，轮廓接刀处的加工误差会明显增大。



对低速走丝线切割来说，还有另外一些影响因素。

首先，冲液压力的大小会直接影响到丝的位置和切割效率。压力大了，有利于排屑，容易保持较高的切割效率。但垂直冲液产生的分力会把丝推向一侧，影响到后面修切时余量的均匀性，甚至有些表面修不出来；压力小了，供液不充分，很容易产生断丝，尤其是当切割斜度较大时。

通常，2°以内的斜度加工可以等同于直壁加工；大于 2°时就必须兼顾加工效率与加工精度两方面的要求，在不影响精度和不断丝的前提下来设置压力。对于有随动连杆机构的机床来说，尽管加工中可以实现同轴冲液，但超过 2°后水嘴与工件之间的密封状态便不能维持，高压冲液也就失去了意义。

在这方面，浸液式线切割机床要较冲液式机床的冲液状态好得多。表现为：在同等压力条件下的粗加工没有水飞溅，不易断丝；精加工时可以使用更小的冲液压力来减少水流的干扰，尤其是对大厚度工件，避免这种干扰就能减少一个重要的不利因素。

对于冲液式机床在作斜度切割之前，如果不是将上下水嘴的流量分别调定好，使工作液均匀地包裹在丝的周围，就有可能在修切过程中让空气混入加工区域，使放电会变得不稳定，并伴有黄色火花和不连续的放电声响，影响工件的表面质量。

其次，上下导向器及其周围元件对斜度加工的影响。

目前，多数机床上使用的是拉丝模状的圆孔导向器，由宝石或金刚石制成，有两种不同的配合间隙，适用于不同的穿丝机构。

较小的径向间隙约为 0.002 ~ 0.005 mm，称为封闭式导向器，其导向精度高，丝的尖端须经过热拉拔处理，缩径后方可通过，常用于高端线切割机床产品。

较大的径向间隙约为 0.015 ~ 0.020 mm，尽管都是孔状，却被称之为开放式导向器。顾名思义，开发式导向器能让丝更顺利地通过，对丝的尖端要求也不高。但是，丝在穿过这种导向器之后并不是悬浮在孔的中央，而是被进电块或其他辅助导向元件抵向一侧，犹如 V 形导向器，有着同样的可靠定位。

进行直壁或 2°以内的小角度加工，对导向器上孔的间隙、圆度、过度圆角以及在 Z 方向上与基准的位置偏差不是很敏感。当加工的斜度变大后，这些因素所产生的影响也就不容忽视。过大的磨损间隙和变差的孔型会直接影响加工后的尺寸精度；圆角上的磨损与导向器在 Z 方向上的安装误差会影响切割的角精度。

另外，在大斜度切割时，丝在导向器端部受到附加的弯曲应力作用，并随着角度的增加而加大，摩擦阻力也随之增加，使得丝的张力发生改变。一个明显的结果就是，工件表明上的条纹增多，看上去远不如直壁加工光滑。

为解决变角度加工中丝的张力总在变化，影响表面质量这一问题，一般要求当加工斜度大于 2°时，粗切和精切必须采用相同的张力值。如果为了追求粗切时的大效率而采用减小张力的办法，在精切时再将张力值恢复到标准值，就有可能出现有些表面修不到的情况。所以，现在的许多新型线切割机床针对大斜度加工采用了变张力控制，张力调节可以随着切割角度的增大自动减小，从而使放电区域内的这段丝的张力始终保持恒定。

通常，机床的生产厂家不标明其产品在大斜度加工时的精度指标，部分原因也是出于多种因素的影响，在用户验收时，完全复现存在着一定的离散性。

有数据表明，如果进行≤2°的斜度加工时的角度偏差为 ±0.02°，加工 30°以内的斜度时偏差将达到 ±0.08°以上。同时，表面粗糙度 R_a 值也会由 0.4 μm 升至 1.0 μm，尺寸精度由 ±0.004 变为 ±0.020。所以，作为使用者应该掌握自身机床在大斜度加工时的误差分布状态、敏感因素和补偿方法，才能加工出满意的零件。

(3) 参数调整

按机床说明书来设定、或由系统自动地生成加工参数是最为常见的加工前的参数输入方式。不仅如此，如果使用者能对一些重要参数的作用以及对其调节所能产生的影响有更多的认识，那么，工作的主动性就会得到进一步的发挥。

1) 电参数　单纯拿线切割机床和磨床来作个对比的话，显然对电参数的选择就如同磨削加工中的对砂轮材质、粒度和磨削用量的选择一样。由粗到精的整个放电加工过程，实质上就是对放电火花在时间和能量上进行分配，使之在工件的指定空间上产生所希望的有效去除，排除术语上的差异，体会其物理过程，将有助于加深对这一整套参数的认识。

在名目繁多的电参数中，有相当一部分的作用是相似的，有的是为了增加某种特性而专门设置的特殊参数，这些参数也不一定出现在所有的机床上，大致有如下几种。

① 加工模式　由于在实际的粗、精加工中所用到的放电能量跨度十分巨大，电极丝上加载的平均电流大到 50 多安培、小到几十毫安；所用的丝的直径，最细的为 0.03 mm（截面 0.000 7 mm²），最粗的丝有 0.33 mm（截面 0.085 mm²），截面相差 120 倍！为了使高频电源能满足这样大的输出跨度，有些机床采用加工模式作为一种特定的参数选择方式来规定加工类型，以满足粗、精甚至微细加工时不同的功率输出的需要。

② 放电电流　由工艺要求、工件材料、切割高度以及丝的类型、直径来决定该参数。该参数表征的是高频电源所能提供的最大电流，而不是实际要加载的电流，实际加载的放电电流受到放电功率参数的影响。该电流参数在正常加工过程中是不允许被改变的，改变放电电流会直接影响到工件的表面粗糙度和放电间隙的大小；电流值设定得越大，粗糙度和放电间隙也越大。频繁断丝时，降低放电电流能最直接地起作用，但必须考虑到工件对间隙的变化以及损失的切割效率，一般是放在功率参数后来进行调整的。

③ 放电功率　由于放电蚀除是 N 个有效的脉冲能量叠加的结果，放电功率由脉冲频率来决定，表征的是间隙上加载的能量的大小，对切割效率有直接的影响；功率越大，实际放电电流也越大，切割速度越快。大功率切割会产生较大的轮廓误差和较厚的热影响层，并增加了断丝的风险，尤其是当冲液条件不好的时候，或者是在进行斜度较大的切割时。粗加工中出现断丝，应先把功率值降低一、两点，看看是否见效，这是最常用的对策，因为对功率参数的调节只是在加工速度与断丝两者之间作出平衡的选择，不会影响到最终的加工结果。

④ 空载百分率　在一个放电脉冲周期内空载所占的百分比。改变其大小，会影响加工的稳定性和母线的直线度。

通常，在粗加工中，空载百分率设定在 25% ~ 30%；若过分减小，加工速度可能略有提升，但稳定性会降低，断丝的风险也会相应加大，同时轮廓精度会变差，对后续的多次切割不利。

在精加工中，空载百分率一般设定在 40% ~ 45%，以兼顾切割精度与效率。虽然，减小空载的比率不会造成断丝，但会导致对粗加工后轮廓的修整不充分，使“误差复映”得不到很好的纠正，母线变凸。相反地，如果一味地增加空载百分率，会更多地损失效率，母线反而变凹，同样影响精度。

低速走丝线切割加工时，如粗加工的放电状况不稳定，适当增大空载百分率不仅能明显地使加工变得稳定，切割速度也会有所回升，同时还能降低断丝发生的概率。高速走丝

线切割则应采取无空载百分比的过跟踪控制。

⑤ 恒定速度　设定加工时的进给速度为某一恒定值。类似于磨削中"光磨"时采用的固定横向进给速度。不管有没有放电，进给都不受伺服检测的控制，始终以选定的速度前进，以适应弱规准下的修切需要，特别是对于那些大厚度工件，用弱规准加工时由于丝上分布的能量密度太小，会使伺服调节非常困难，导致进给速度极不均匀，甚至停在一点上不走，持续放电，使工件报废。该参数对加工速度和母线形状都有影响。与空载百分率类似，进给速度过慢会损失效率，母线会变凹；反之，过快，会导致母线变凸。

⑥ 短路电流限制　在粗加工中，瞬间过大的短路电流是造成断丝的主要原因。该参数用于大电流加工中对有可能产生的短路电流按预先设定值进行削减，防止断丝的发生。参数的取值越大对短路电流削减的幅度就越大，加工中越不容易断丝，但同时切割效率也会降低很多。对没有任何前兆的频繁断丝，如果增加空载百分率收效不大，可加大该项设定值。

为防止断丝，还有一种参数是用于对短路进行斩波处理，即：加工中出现了 N 个短路脉冲后自行削去后面的若干个，满足变截面加工时对电流陡变的适应。

⑦ 附加正极性电压　在间隙上叠加一个正极性的低压直流电源，获得类似于电解的某种效应，以提高细丝、小电流加工时的效率和降低硬质合金修切后的表面粗糙度。

⑧ 脉冲宽度　决定单个脉冲能量，直接影响加工速度和表面粗糙度。在其他参数不变的情况下，脉宽越大，放电能量也越大，加工速度会有所加快，但断丝的可能性也会加大，粗糙度变差。在实际应用中，先是根据工件最终的要求来选择该项参数，加工中一般不作调整，减小每挡加工所对应的脉宽，对降低该挡的最终粗糙度作用不大，反而影响加工效率。

⑨ 空载电压　根据不同的工件材料以及丝的类型来选择，对熔点高的难加工材料和使用带涂层的丝选择较高的空载电压。提升空载电压能使被加工材料和电极丝表面材料放电时的汽化过程加剧，汽化压力增高，放电间隙加大，促进排屑，提高加工速度，同时粗糙度会变大。降低空载电压尽管对减小粗糙度有利，但对加工稳定性不利，尤其是在弱规准的精修过程中，会导致加工短路、停顿、空走、不发生放电，使表面质量和尺寸精度恶化。所以，该项参数一般不作为加工时的可调节参量。

⑩ 伺服调节　根据间隙电压的检测值与设定的基准相对比，给出加工时的进给速度上限，用来决定放电跟踪的紧密程度。伺服调节的敏感程度会影响到效率、稳定性和母线的凸凹，过于敏感会导致加工表面条纹增多。由于该参数与其他参数在加工策略方面关联密切，在给用户的加工条件中的数值已经是经过大量测试、优化过的，一般无需加以改变。

⑪ 拐角策略　加工中，由于放电力的作用，丝产生挠曲，滞后于前进方向。在进行直线和大曲率半径切割时，这种滞后现象带来的不利影响并不明显。当加工到有小圆弧的拐角处，这种滞后就会带来较大的拐角误差。凸出的尖角因丝的滞后被抹去、凹进去的内角得不到充分的放电而被让过，最终拐角处加工出的实际圆弧半径会比要求的大很多，而且不圆。粗加工中的切割速度越快，拐角误差就越大，误差复映也会影响到后面多次切割的精度和加工速度。

因此，随着大效率切割指标的不断提升，当加工轮廓上存在着大量圆弧时（$R<3$），拐角策略的作用就变得比较明显。其作用的实质就是减缓丝在拐角处的行进速度，把丝在放电力作用下产生的挠曲降低到最小程度，减小滞后量。

粗加工时，系统根据拐角处圆弧半径的大小，自动进行判别，减弱放电能量和冲液压力，以此降低丝在拐角处的行进速度和作用在丝上的放电力，使丝尽可能直地通过拐角，加工出接近理想的轮廓形状，并使精加工的余量均匀。

在修切加工中，同样是以降低拐角处的加工速度为主要策略，并辅之以反方向上的轮廓修切，抵消滞后的作用方向。还可以对拐角反复修磨直至放电空载率达到一定比例后，再进入下一程序段进行加工，这取决于所依赖的工艺模型和机床的重复定位精度。

由于拐角策略是从大量试验数据中得出的一种经验方法并被固化到控制软件中，所以，加工中如果试图调整拐角策略参数也仅仅是为了修正状态的偏移，多数情况下直接调用即可。

在含有大量小圆弧轮廓的加工中，适中的加工速度是保证拐角精度的首要措施，即便在所使用的机床上没有拐角策略，或者感觉其效果并不理想，也可以通过改变编程方法、调整其他参数来达到同样的目的，尽管没有直接调用拐角策略来得方便、快捷。

通常，加工中选取的拐角策略越强、圆角精度越高、加工速度降低得就越多，这取决于使用者所强调的方面。在关注拐角精度的同时，不要忽略对加工出的母线直线度结果的核对。

2) 电极丝的参数　电极丝的基本参数有丝的类型、直径和长度，设定参数包括丝的张力和丝速。基本参数由加工要求决定，设定参数由选择的加工条件决定。

① 丝的张力　丝的张力设定范围为 1～30 N，取决于丝的材质和直径以及对拐角精度的要求。在同样的放电条件下，增加张力值对提高加工精度有利，尤其是对于切割厚度较大的工件，较大的张力值是获得较好母线直线度和拐角精度的基本条件。

加大张力的负面影响是容易引起断丝。大效率切割后的丝，在其表面上可以明显地看到布满的坑穴，直径方向上的损耗高达 1/4，抗拉强度被大幅削弱。因此，在一些精度要求不高的加工场合，如果追求更高的加工速度又不至于引起频繁的断丝，可以适当地降低丝的张力。

在粗、精加工中交替地使用不同的张力值，要注意由此带来的丝的空间位置的改变，为保证后面多次切割余量的均匀，最好增加一遍不改变偏移量的粗的修切，并采用较大的空载百分率，以减小误差复映对后面精加工的影响。斜度切割时，应始终采用同一张力值，避免因张力的改变造成角度的变化，使有些面修切不到。

② 丝速　在高速走丝线切割中，丝速对于工作液进入间隙、促进排屑、带走热量、消除电离以及减少断丝起着至关重要的作用。由于电极丝是往复使用的，丝速的高低都不会引起耗材增加的问题。

在低速走丝线切割中，经常可以见到操作者为了减少丝的消耗，常常根据所使用的丝的线径和工件的加工高度，在保证母线精度和不断丝的情况下，选用适中或偏低的丝速，而不是完全依照参数表来设定。这种调节必须是经过加工验证过的，否则，丝速低了会因损耗过大而产生斜度或者频繁断丝。

③ 电极丝材质与丝径　对于涂层丝，由于增强了放电时丝表面材料的汽化作用，更利于排屑，所以尽管在较低的丝速情况下运行，仍不易断丝，并能获得较高的表面质量。实际生产中，在比较丝的价格和单位时间内丝的消耗量时，应与合理的选型、对不同电源的适配程度以及需要获得的精度联系起来，把握好性价比。

直径 $\phi0.05$ 及以下的丝，通常是钨丝，以保证运行时必要的抗拉强度，用于有特殊小圆角要求的轮廓的加工，例如：$R=0.02\sim0.05$ mm。除使用极其微弱的放电规准外，张力和速度必须追求十分稳定。



在高速走丝线机床上使用这样的细丝，须保证每个导轮运转时的正反向阻力矩相等，且为最小，丝的路径越短越好；上丝时预紧的张力应十分均匀，最好有校定；换向延时适当加长，以减少换向冲击；丝速可降到使用粗丝时的一半，甚至更低，因为用这种丝径所加工的工件厚度都不会太大，切割超过 10 mm 后，结果也不会太好。

细丝在低速走丝线切割机床上运行，所有与丝接触的环节都必须确认。否则，看似设定好的丝速和张力与实际值之间很可能存在不小的差异，尤其是在不常使用细丝的情况下，变换使用细丝，极易引起加工中断丝，最好用张力计事先校核后再加工。为运用细丝所进行的必要的零件更换和保养，是必不可少和需要增加成本的，事先要有所考虑。

3）冲液参数　高速走丝线切割机床所用的线切割液，基本上靠配比调定，使用中无需加压，完全可以由丝带入间隙，最多分别对上下水嘴的流量作一点非量化的调整，操作很简单。

大多数低速走丝线切割机床使用纯净的水作为介质。上下冲液的压力和流量可以分别设定，浸液或非浸液加工方式的选择以及水的电导率设定，对加工速度、避免断丝和最后的加工精度有着至关重要的影响。

对于不断创纪录的大效率切割来说，冲液压力的大小与稳定性几乎起着决定性的作用。大电流加工时，切缝中的丝几乎是处在断与不断的临界状态，丝上受到的热轰击与包围它的冷却介质一旦有瞬间的失衡，必然会导致断丝。一些新推出的机床已将最大的冲液压力提高到 2.2 MPa 以上，其目的就是为了克服介质的延程压力损失，加大通过间隙的有效流量，使更大的放电能量能够加载到丝上。对于大厚度切割，更强调了上下喷嘴的指向性，使之有更好的液流导向。

另一方面，精加工时，尽可能减小冲液对丝的扰动，在冲液压力仅为 0.02 MPa 时，也能保持液流的稳定和对丝的包裹。

为适应各种加工需要，通常有以下几种不同的冲液方式。

① 两水嘴按同一设定的压力值来进行冲液，常用于上下表面平行的工件的切割。

② 分别设定上下水嘴不同的冲液压力，以适应无法满足冲液密封条件下的工件切割。

③ 上冲液、下抽液，以此来减小冲液对丝的扰动，有利于放电蚀除物迅速排除出加工区域，保持液槽内介质尤其是下水嘴处电导率的稳定，常用于一次切割成形、工件下表面凹进或为斜面，具有兼顾加工速度和精度质量的特点，前提是须在浸液式加工条件下进行。

④ 根据切割断面的变化以及拐角策略的安排，配合高频电源和伺服进给，进行冲液压力的自适应调节。

⑤ 在较低的冲液压力下，分别调定上下水嘴的流量，使水柱平稳地包裹着丝，满足修切，尤其是在非浸液条件下进行大厚度修切时对水流稳定性的要求。

⑥ 由于过滤器堵塞，清洁水供应不足，系统自动减小冲液压力和放电能量，降低加工所需的流量，使切割不会因总的水量不够而中断，特别是在无人加工条件下。

4）浸液与非浸液式加工　浸液式加工具有放电稳定、不易断丝、切割效率高、精度一致性好以及无溅射等优点，是非常适宜低速走丝线切割机床的一种加工方式。当机床具有了这种功能，就应该充分加以利用。除非在一些特殊的情况下，需关掉此项功能，改为非浸液式加工。比如：

① 加工非常细小的多孔型腔时，单个型腔的加工时间极其短暂，自动穿丝无法准确地实施，经常需要人来干预；工件非常重要，任何一个操作都不能有失误，需要实时地观察。总之，在门总是需要敞开着的场合下，不能使用浸液式加工。

② 利用工装进行批量零件的单工序加工，由于放电时间短暂，为缩短辅助时间和工件装卸方便。

③ 利用特殊附件进行加工，附件不能被水浸泡。

④ 工件超长，工作液槽门无法关闭。

⑤ 工作液箱的水位过低，不能维持浸液式加工所需要的最小水量，又来不及补充，只好作非浸液式的加工。

5）电导率设定　水的电导率高低直接影响到放电间隙和表面粗糙度的大小，通常设定在 1～15 μS/cm 范围内；丝越细，选择使用的电导率越低；电导率越低，放电对工件的电解腐蚀作用就越小。使用 $\phi0.03$ 的电极丝需将电导率设定在 1 μS/cm，而使用 $\phi0.25$ 的电极丝时，设定在 10 μS/cm 即可。电导率设定的数值越低，离子交换树脂的寿命就越短，维持成本就越高。

通常，电导率检测点被设置在冲液回路上，以便能够准确地反映出介质的当前测量值。除此之外，浸液式机床液槽中水的电导率也受到监控，对于一些机床来说，当检测到的电导率大于 25 μS/cm，并工作超过 30 min 后，系统报警、自动中止加工，以保证尺寸的一致。

（4）用试切方法验证所设置的参数

当所有的参数设定好后，便可以加工了。对于拿不准的参数或重要的工件，用事先切个小的试件来确认机床的工作状态和设定的参数，是常用的验证方法。

试件的材料最好与工件相同，甚至可以直接在工件将要被切掉的部分进行试切。

试件的形状取决于测量手段和加工中重点关注的方面。例如，加工模板上的型腔，先在板上找一个定位销孔来试切，用内径千分尺进行在机测量；参数经核实或修改后，就可以将所有型腔加工完成。

又如，凸模加工之前，先切一个四方形，考察一下偏移量、母线直线度、圆角误差、表面质量以及必要的修切次数。尽可能不要用圆柱形作为切割试件。因为像材料的变形、非最佳设定状态、断口预留弧长以及直径大小等选择都会使测量结果的离散程度加大，不利于找出正确的补偿值。由于圆加工不是线切割的特长，最容易暴露出系统的缺陷，是一种较为苛刻的检查图形，如果要用的话，最好是选择圆孔而不是圆柱来加工；用圆度仪而不是用两点式的测量工具千分尺或工具显微镜来对圆度进行评价，其目的是为了避免非机床因素最终对判别数据的影响。

试件的尺寸与工件的厚度有关。过小，会带来其他的误差，影响判别；过大，耽误时间。对于 30 mm 厚的工件采用 5 mm×5 mm 的方形试件，这样的长径比就比较合适。对从未加工过的特殊工件，需要针对特点来选择试件的大小和工艺，为了避免变形，不一定要割下来，能够切出所要验证的形状并且容易测量即可。

试件的加工记录要注意保留和总结，有了一定的积累后，便可以归纳出一些经验数据，在实际工作中直接应用，减少大量的重复性劳动和人员变更所带来的知识中断，实现稳定生产。

3　电火花线切割加工多次切割工艺

3.1　电火花线切割加工的工艺类型

电火花线切割加工的工艺类型取决于不同的需求，有的着眼于加工速度的高速切割，有的则着眼于加工精度的多次切割，还有兼顾二者的一次切割。在实际应用中，高速走丝线切割机主要用于一次切割或加工精度要求不高的高速切割；低速走丝线切割机则主要用于加工质量要求较高的多次切割。

随着市场需求的多样化以及线切割自身的技术进步，这

种界限也在发生着改变。高速走丝线切割采用了一些特殊工艺后也能进行多次切割；低速走丝线切割不光是多次切割后的精度高、重复性好，而且一次切割的速度指标也已经提高到一个新的高度。总之，这两类机床各自的技术经济性在不同的用户中有着不同的判定标准，自身技术的发展与市场的选择将决定未来的走向。

由于这两类机床在功能和特点上相互渗透、互为补充，并将在一个很长的时期内共存，所以，有必要以发展的眼光来看待这三种加工类型，而不是仅以目前机床的类型来划分。

（1）高速切割

不懈地追求切割的高速度，对高、低速线切割机床来说始终都是个未尽的话题。

用高速走丝线切割机床进行高速切割，目前能够用于稳定生产的 120 mm^2/min 的切割速度，此时加工误差达 0.05～0.10 mm，加工表面粗糙度 $R_a6.3$ μm。所用的电规准为单脉冲能量较大的粗规准（$t_{on} \geq 80$ μs，$I_m \geq 50$ A），电极丝直径 $\phi0.18 \sim 0.20$ mm，高速切割时的切缝和放电间隙都比较大，连续切割时间约为 48 h，断丝前的丝径损耗达 0.04～0.05 mm。适用于模具零件的粗成形，硬、脆材料的下料加工、单件以及小批量零件的生产。其特点是简单、可靠，加工成本低，与低速走丝线切割相比，其最大优点是不要求工件上下两表面相互平行来保证压力冲液的实施，尤其是针对厚工件沿不规则边缘的切割，高速走丝线切割加工起来比低速走丝线切割容易得多。

提高电源的加工效率、延长电极丝的使用寿命，是机床制造厂商为高速切割确立的有待持续改进的目标。

实现这种高速切割，如果单靠加大丝径和平均放电电流，会带来负面影响。加载在丝上的放电电流越大，丝径损耗就越大，意外断丝的概率也相应加大，有可能得不偿失。而通过增加丝筒的储丝量、减少换向次数、缩短换向时间，对断丝前兆有更好的诊断、预防策略，也会对切割效率有所促进。

用低速走丝线切割进行高速切割，目前的最高效率已达到 500 mm^2/min，在实际生产中能应用到的高速切割在 320～350 mm^2/min 左右，低一点的为 270～300 mm^2/min，通常使用 $\phi0.30 \sim 0.33$ mm 的涂层丝，1.2～2.2 MPa 的冲液压力，尺寸精度 0.03～0.05 mm，表面粗糙度 $R_a3.2$ μm。适用于工件尺寸和圆角半径较大，具有平行表面、满足压力冲液条件、轮廓不太复杂、切割路径较长的工件的加工。通常这类工件对加工精度要求不高，不作多次切割，对工件材料表面粗糙度和变质层厚度不敏感。

虽然高速切割的最大的优势是加工速度，却也带来了一些不可忽视的问题，比如：由于电极丝加粗，电流加大，蚀除物成倍地增加，使过滤纸芯的负荷加重、寿命缩短；普通的黄铜丝承受不了大电流的轰击，必须使用带有涂层的电极丝和被称为“铜包钢”的新型电极丝。高压冲液不但能耗高而且噪声大，再加上大电流放电时产生的噪声，都将给车间环境带来不良影响。

由此看来，高速切割还远未达到理想的程度。比如：高速走丝线切割的加工速度如果能再快一些，稳定在 150 mm^2/min，加工 50 h 不断丝；低速走丝线切割对不良的冲液状态不再那么敏感，新型电极丝的价格与普通丝相差不太大，能稳定在 300 mm^2/min 左右，这些加工类型将会有更广阔的应用前景。

（2）一次切割

一次切割也称为单次切割，是在切割速度与加工精度之间取得某种平衡的加工类型。按照传统的说法，高速走丝线切割只适合于作单次切割；低速走丝线切割的一次切割也叫做质量切割，其含义就是不求最快，但求一定的精度质量，是应用面最广的一种加工类型。

高速走丝线切割机一次切割的水平基本上是依据国家标准的规定：在 30 mm^2/min 条件下，获得不大于 $R_a2.5$ μm 的表面粗糙度和 0.015 mm 的尺寸精度，并能在实际加工中根据要求做出调整。当需要更高的表面质量时，可以通过损失一些加工速度来获得；想要切割得快一点儿时，可降低一些对粗糙度的要求。例如：在同一台机床上选择更弱的加工规准，可以降低单个脉冲的能量，虽然切割速度会下降到 20 mm^2/min 以下，却能获得 $R_a1.6$ 甚至 1.0 μm 的粗糙度。不同的机床能够调节的参数范围会有所不同，每台机床究竟能切出什么样的水平，还需要具体分析。

低速走丝线切割机一次切割的水平，一直在稳步地提高。20 年前的切割速度为 60 mm^2/min，表面粗糙度 $R_a2.0$ μm，尺寸精度 0.015 mm。而当前的最高水平是在相同的精度指标下，切割速度达到 200 mm^2/min。除此之外，为适应市场的不同需求，追求更高质量的一次切割也在不断地推进，对使用者来说，即使是降低一些切割速度，比起多次切割，还是简化了操作，总体上仍然是节省了时间和各种消耗。

与高速切割不同的是一次切割更注重进给的控制策略，尤其是在曲率半径较小的圆弧或拐角处。由于形状精度与母线直线度是一次切割的保证重点，所以，像丝的张力与冲液方式这类外部条件必须与之适应，如加大张力、改双向高压冲液为和单方向适应调压冲液，以减少对丝的扰动。由于在低速走丝线切割机上可以同时对电源、进给、张力和冲液等多种参量进行按数据库要求的动态调节，所以，只要数据库做得好，对典型零件的一次加工都会有比较理想的结果。

（3）多次切割

对于很多精密加工来说，高速切割和一次切割的质量水平还远不能满足所有的要求。就像在冷冲模具中，要求刃口的表面粗糙度 $R_a1.2 \sim 0.8$ μm 是一项很普通的指标，粗糙度值再低一些就更理想，比如达到 $R_a0.6 \sim 0.3$ μm。这样可以使模具的初期磨损减小、配合性质稳定、耐用度提高。为获得这样的粗糙度，仅靠一次切割，过低的加工速度是无法被生产部门所接受的。所以，多次切割的一个基本概念就是设法把粗、精加工分开，用主切和修切两种加工程序来解决既要快、又要好的矛盾。

主切以速度为主，但也不完全等同于高速切割，主要是为了减少误差复映对后续加工的影响。

修切在某种意义上来说，已经不是切的概念了，而是一种采用线电极的电火花磨削。它担负着两重任务：校正主切后留下的轮廓误差；提升工件的表面质量。修切可以是切一次，也可以是切 n 次，甚至可以做成某种特定的专家系统，进行电火花研磨，即利用创成规律实施有指向性的加工。修切所采用的工艺策略和建模所依赖的数据库是最终加工速度和质量构成的核心。

在多次切割方面，低速走丝线切割始终是生产应用的主体。表 3.5-4 对某种线切割机床典型的四次切割进行的效率分析。

表 3.5-4　低速走丝机多次切割工艺效果

切割次数	偏移量/mm	单次切割速度 /$mm^2 \cdot min^{-1}$	表面粗糙度 R_a/μm
1	0.246	142	2.0
2	0.166	130	1.0
3	0.146	168	0.6
4	0.136	124	0.45



从表3.5-4中不难看出，粗糙度与加工速度几乎是成比例下降的，并且还有这样的规律：粗糙度降低一级，加工时间延长一倍。这种简单的判定方法，在生产中可以用来快速估计加工时间。

采用高速走丝线切割机进行多次切割，目前已从实验室走入市场，使很多没有低速走丝线切割的用户在提高精加工效率和表面质量方面也有了新的加工手段。表3.5-5所列是与表3.5-4可比的一组多次切割工艺效果，使用 ϕ0.18 mm钼丝加工50 mm厚的Cr12工件。

表3.5-5　高速走丝机多次切割工艺效果

切割次数	偏移量/mm	单次切割速度 /$mm^2 \cdot min^{-1}$	表面粗糙度 R_a/μm
1	0.16	93.6	3.6
2	0.10	58	1.55
3	0.093	41	1.0

尽管二次切割以后的加工速度比低速走丝的多次切割低很多，但比起采用高速走丝的一次精加工的切割速度几乎提高了一倍，而且精度也好得多。低成本地改善高速走丝线切割的精加工性能，无疑是一种适应国情的技术进步。

3.2　多次切割的必要性及其应具备的条件

随着模具工业的发展，线切割加工不仅要速度快，而且要求有尚佳的加工表面质量。国外低速走丝电火花线切割加工机都采用多次切割工艺，即第一次切割用较大的电规准进行高速粗切割，然后用第二次、第三次甚至第四次切割逐步用精规准和精微规准进行修光，以获得理想的加工表面质量和加工精度。低速走丝线切割加工多次切割应用结果表明，多次切割工艺是解决速度与加工表面质量矛盾，获得较高综合工艺效果的有效办法。

在低速走丝电火花线切割机推广应用多次切割技术的同时，中国高速走丝电火花线切割机也进行了大量的多次切割试验，虽在实验室环境下获得了一定的成功，利用三次切割工艺加工出了质量较好的零件，但直至今日，仍无一家在生产中得到应用。其主要原因是，在电极丝高速移动情况下，运丝系统工作不稳定，电极丝的空间形位变化异常，使前后二次切割时的空间位置无法重叠，加上中国式WEDM的往返切割条纹明显，要进行多次切割是困难的。

前人所进行的大量试验研究所得到的许多有益的结论，对继续深入研究高速走丝线切割机多次切割工艺有重要意义。中国的高速走丝WEDM采用多次切割工艺，不仅有必要，而且是有可能的，但必须创造如下条件：

① 按国家有关技术标准，严格控制高速走丝WEDM机的制造精度和走丝系统的稳定性；

② 深入研究电极丝在加工过程中的空间形位变化，并提出稳定电极丝空间形位的有效措施；

③ 采取有效措施，控制往返切割条纹的产生；

④ 现有高频脉冲电源及跟踪控制都是为一次切割工艺而设计的，需根据多次切割需要对原有高频脉冲电源及跟踪控制系统进行必要的改造；

⑤ 深入研究高速走丝电火花线切割机的多次切割工艺，确定粗切割、精修及精微修光的脉冲参数、加工轨迹补偿量、电极丝移动方式及其速度等，并开发相应的多次切割软件。

3.3　电极丝的空间形位变化

（1）形位变化理论计算

电火花线切割加工（WEDM）是用一根细长的柔性金属丝做工具电极。在高速走丝电火花线切割加工时，由于储丝筒及导轮的径向跳动和轴向窜动，必然会引起电极丝的振动，而且加工时的放电力还会将电极丝推离放电区，使电极丝向后（沿进给的反方向）弯曲并产生一定的挠度。在极限的挠度条件下，可以把这一动态过程看成是静态的变化，其弯曲部分近似为一段弧线，即放电点实际上已偏离理论切割轨迹一个 Δy 距离，加上这个挠度变化还会改变导轮实际支点变化（电极丝弧线与导轮的切点并不在导轮中心线水平面上），这就需要研究其放电点究竟偏离轨迹线多少，如何稳定电极丝的形位变化，使先后二次加工的加工诡计线能基本重合。

1）电极丝形位变化方程　在电火花线切割加工之前的静止状态，电极丝是以上、下两个导轮外沿支点（切点）相连的一条直线。但在加工时，由于放电力的作用和外界的各种干扰，电极丝的空间位置必然会发生变化：一方面在放电力的作用下被推离放电区而弯曲，另一方面还会发生波动（振动所引起），并满足下述振动方程；

$$\rho \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} - F \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + f(x,t) = 0 \qquad (3.5\text{-}10)$$

式中，ρ 为电极丝的密度；F 为电极丝的张力；f 为电极丝的横向力。

在未切入工件之前，这种振动是可观的，其振幅有时要超过1 mm。当电极丝切入工件之后，用闪光测频仪对切缝里的电极丝振动进行测试，发现放电干扰经过一次振动后振幅就大幅度衰减。因为加工时切缝中的工作液对振动有很强的阻尼作用，加上高速走丝往往采用过跟踪控制，允许它在加工过程出现一定的短路脉冲来抑制电极丝振动。故可以认为，在稳定切割的情况下，电极丝的振幅很小，对加工精度不会发生很大影响。这样，电极丝在放电力的作用下所发生的形位变化主要是弯曲。假设放电力 f 集中在放电区的中央，且无其他阻尼作用，则电极丝向外弯曲情况如图3.5-45所示。在极限挠度条件下，可以把该动态过程看成是静态的，弯曲部分近似为一段弧线，并可按式（3.5-11）来描述其挠度 y：

$$y_1 = \frac{f(L-H)}{2F}$$

$$y_2 = \frac{fH}{4F}$$

$$y = y_1 + y_2 = \frac{2fL - fH}{4F} \qquad (3.5\text{-}11)$$

式中，y 为挠度；L 为电极丝的跨度；H 为工件厚度；f 为放电力；F 为电极丝张力。

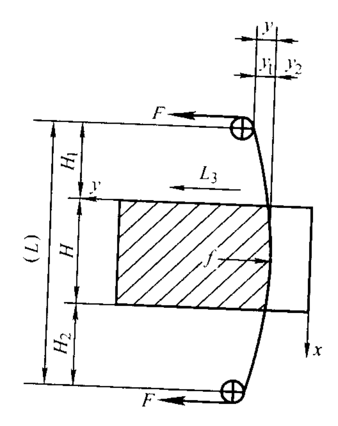


图3.5-45　电极丝形位变化

2）电极丝挠度大小　在高速走丝情况下，电极丝的张

力不是稳定不变的，而是与绕丝松紧程度及运丝过程阻力有关。按图 3.5-45 所示方向切割时候，不仅电极丝跨距会增大；而且不利于电极丝收紧；如果按图 3.5-45 所示的相反方向切割，则不仅跨距会减小，而且有利于紧丝，结果必然会使挠度减小。这就是大家常说的 L_1 方向切割比 L_3 方向切割较稳定的原因所在。

(2) 电极丝偏移量实验测定

在实际加工时，放电力并非集中在工件中间的某一点，而是均匀分布在整个厚度方向上，还应考虑到工作液的阻尼作用等。可以通过实验检测电极丝的挠度，验证是否仍然能满足式（3.5-10）的关系。

1) 实验设备和条件　TP－25 高速走丝电火花线切割机，钼丝直径 ϕ0.18 mm，工作液为 10% 的皂化油乳液，工件材料为淬火的 Cr12。

2) 实验步骤

① 先从 L_2 方向切割，以获得一个平行电极丝的基准面，如图 3.5-46 所示。

② 在 $+y = 2$ mm 处，沿 L_3 方向切割 3 mm，突然切断电源后退出。

③ 在基准面的反面，$+y = 2.09$ mm 处沿 L_1 方向将试样割下。

④ 所用的试样上，有一条反映挠度的痕迹，用 KEYENCE 高精度数字显微镜（型号：VH－8000）可进行观察和测量。

测量试样时，严格按图 3.5-46 设定的坐标系记录，两组试验的测试结果如表 3.5-6 所示。

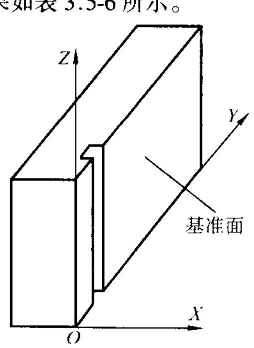


图 3.5-46　实验时的工件

表 3.5-6　挠度测量结果

测量点	切割长度 y/μm	
	试样 1	试样 2
$X = 0$ mm	2 918.90	2 920.81
$X = 2$ mm	2 919.31	2 919.32
$X = 4$ mm	2 919.26	2 918.85
$X = 6$ mm	2 918.63	2 921.31
$X = 8$ mm		2 922.86
$X = 10$ mm	2 916.95	2 923.67
$X = 15$ mm	2 915.32	2 924.20
$X = 20$ mm		2 925.27
$X = 25$ mm		2 924.96
$X = 30$ mm	2 915.11	2 925.47
$X = 35$ mm	2 915.11	2 927.03
$X = 40$ mm	2 914.95	2 927.68

续表 3.5-6

测量点	切割长度 y/μm	
	试样 1	试样 2
$X = 45$ mm		2 929.05
$X = 48$ mm		2 930.59
$X = 50$ mm	2 914.92	2 931.25
$X = 55$ mm	2 914.80	
$X = 60$ mm	2 914.85	
$X = 70$ mm	2 915.31	
$X = 80$ mm	2 915.62	
$X = 90$ mm	2 917.01	
$X = 95$ mm	2 918.17	
$X = 100$ mm	2 919.11	
挠度 y_1	43	49
挠度 y_2	4.5	20

试验时所用的实际参数见表 3.5-7。

表 3.5-7　试验参数

参　　数	试样 1	试样 2
工件厚度 H/mm	100	50
电参数代码	$P_{Ⅲ}$	P_{433}
上下导轮跨距/mm	240	230
H_1/mm	70	120
H_2/mm	40	60

(3) 实验结果及分析

1) 放电力所产生的电极丝挠度由 y_1 和 y_2 两部分组成，而 y_1 远远大于 y_2。挠度 y_1 大小基本满足式（3.5-11）。试验还表明，导轮支点离工件表面愈大愈远，挠度 y_1 愈大。

2) 工件内部的挠度 y_2 一般只有 2～5 μm，而且主要集中在工件上下端面附近，工件内部变化甚微，接近于平直，在切割 400 mm 厚工件时，更能验证这个规则。

3) 放电力所产生的电极丝挠度，在切割直线时对加工精度并不影响，但在切割拐角处时就会产生"塌角"现象，已影响加工精度。如图 3.5-47 所示，沿 L_3 方向切割到拐点后转入 L_4 方向切割，但在转变加工方向时，实际切割点并没有到达拐点，随着 L_4 方向的执行，会在拐点附近形成"塌角"。

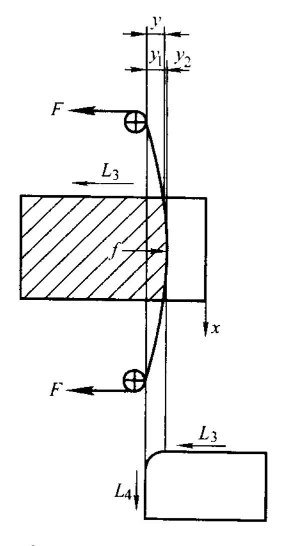


图 3.5-47　"塌角"形成



4）工件上下端面离导轮支点（轴心线）距离不等时，工件上下端的偏移是不一样的。距离愈远，偏移量愈大，使电极丝在工件内部形成一定斜度，这样在拐角加工时，工件上下端会产生不同的误差。如果是切割圆柱体，也会导致两端尺寸不一。其离支点远的一端，所加工出的零件圆径会大于距离较近的一端。如 $H_1 > H_2$，则工件上端尺寸大于大端尺寸。

（4）稳定电极丝形位的措施

为了提高线切割加工的稳定性和尺寸精度，我们应根据电极丝形位变化规律，来稳定电极丝的空间位置，减少其形位变化，主要措施如下。

1）增大电极丝的张紧力，并使支点尽量靠近工件上下表面。在高速走丝电火花线切割加工时，由于没有张力控制装置，增加电极丝的张力通常是适当增加绕丝时的预紧力，并在切割过程中经常收紧电极丝，有人采用恒张力机构，均能获得一定的效果。实际上，尽力缩短导轮支点与工件表面之间的距离较为方便，并有明显的效果。

2）采用红宝石挡丝装置，此方法可以限制电极丝向偏离导轮轴心方向抖动，还可以缩短支点与工件表面之间的实际距离，对稳定电极丝的空间位置有明显的作用。但由于红宝石在加工过程中磨损严重，使用寿命不长，所以难于推广。

3）采用高耐磨性导向装置。为了稳定电极的形位，有人曾组织技术力量开发了高耐磨性导向装置，并获得专利保护（专利号：01253353.X）。该导向装置不仅用了金刚石取代上述的红宝石，延长了使用寿命，而且在结构上有自己的创新，有助于穿丝和工作液的喷人。导向器的孔径与电极丝丝径仅相差 0.01～0.02 mm，而且在装配调整时规定，当导向器中心与电极丝中心重合之后再往靠近导轮轴心移 0.02 mm，使电极丝处于导轮 V 形槽与导向器三点定位状态，实际效果甚好。

3.4 多次切割工艺及其效果

高速走丝电火花线切割机在进行必要的改造并创造了本章 3.2 节提出的多次切割条件之后，进行多次切割是能够获得比较满意的加工效果的。目前市场上 TP 系列新型高速走丝线切割机已经具备多次切割的必要条件，并获得了明显的工艺效果。

（1）第一次切割的工艺参数

第一次切割的主要任务是高速稳定切割。各有关参数选用原则如下。

1）脉冲参数　应选用高峰值电流大能量切割，采用分组脉冲和脉冲电流逐个增大方法，控制脉冲电流上升率，以获得更好的工艺效果。

2）电极丝中心轨迹的补偿量 f

$$f = \delta + d/2 + \Delta + s \qquad (3.5\text{-}12)$$

式中，f 为补偿量；δ 为第一次切割时的平均放电间隙；d 为电极丝直径；Δ 为给第二次切割留的加工余量；s 为精修余量。

在高峰值电流加工的情况下，δ 约为 0.02 mm；s 甚微，约为 0.005 mm；而 Δ 则取决于切割后的加工表面粗糙度。在我们实验及应用的条件下，第一次切割的加工表面粗糙度一般控制在 $R_a \leqslant 3.5\ \mu m$，在考虑到往复走丝切割条纹的影响，$\Delta \approx 2\times(5\times0.0035) = 0.035$ mm。这样，补偿量 f 应在 0.05～0.06 mm 之间，选大了会影响第二次切割的速度，选小了又会在第二次切割时难于消除第一次切割留下的换向条纹痕迹。

3）走丝方式　采用整个储丝筒的绕丝长度全程往复走丝，走丝速度 10 m/s。

（2）第二次切割的工艺参数

第二次切割的主要任务是修光。各有关参数选用如下。

1）脉冲参数　要达到修光的目的，就必须减少脉冲放电能量，但放电能量太小，又会影响第二次切割的速度，在兼顾加工表面质量及切割速度的情况下，所选用的脉冲参数应使加工质量提高一级，即第二次切割的表面质量要达到 $R_a \leqslant 1.7\ \mu m$。减少脉冲能量的方法主要靠减少脉宽，而脉冲峰值电流不宜太小。

2）电极丝中心轨迹线的补偿量 f　由于第二次切割是精修，此时的放电间隙很小，仅为 0.005～0.007 mm，第三次切割所需的加工余量甚微，只有几微米，二者加起来约为 0.01 mm。这样，此时的补偿量 f 约为 $d/2 + 0.01$ mm 即可。

3）走丝方式　为了达到修光的目的，通常以降低丝速来实现，降低丝速虽可减少电极丝的抖动，但往复切割条纹仍难避免。采用无条纹切割技术，并对进给速度进行限速后，可以在第二次切割后基本消除往返切割条纹，加工表面粗糙度 R_a 在 1.4～1.7 μm 范围内。

（3）第三次切割的工艺参数

第三次切割的主要任务是精修，以获得较理想的加工表面质量。

1）脉冲参数　应采用精微加工脉冲参数，脉冲宽度 $t_{on} \leqslant 1\ \mu m$，并采用相应的对策，克服线路寄生电容和寄生电感影响，保证精微加工时的放电强度。

2）电极丝中心轨迹线的补偿量 f　由于此时的放电间隙很小，仅为 0.003 mm 左右，补偿量 f 主要取决于电极丝直径，设精修时电极丝为 d，则 $f = d/2 + 0.003$ mm。

3）走丝方式　由于第二次切割后留下的加工余量甚微（$\Delta \leqslant 0.005$ mm），如何保证在第三次切割过程中能均匀精修，是一个技术难题。首先应保证电极丝运行稳定。以前的做法是将丝速降到 1 m/s 以下，这固然可以大幅度减少电极丝振动，获得良好的工艺效果，但常常会出现加工不稳定的现象，极易受工作液污染程度及其黏度影响，严重时甚至还会使人感到无法正常精修。考虑到工作液要求电极丝与工件之间需要有相对运动速度，在 6 m/s 的情况下采用超短行程往复走丝方式，使每次往复切割长度控制在四分之一电极丝直径范围内，并限制其加工过程的最高进给速度，结果获得了很好的工艺效果。利用这种方法在不同机床上由不同操作人员进行三次切割，均能获得 $R_a \leqslant 1\ \mu m$，且加工表面光泽无切割条纹。

（4）多次切割工艺实验结果

上述多次切割工艺研究成果已用于 TP 系列电火花线切割机，并在不同型号的机床上由不同操作人员加工出了近 200 个零件，都获得了很好的工艺效果。

1）用 ϕ0.16 mm 钼丝在 TP－25 机床上加工图 3.5-48 所示 45 mm 厚的零件。

第一次切割：$f = 0.150$ mm，$I = 3.4$ A，$V = 81$ mm^2/min，$R_a = 3.40\ \mu m$

第二次切割：$f = 0.090$ mm，$I = 1.2$ A，$V = 49$ mm^2/min，$R_a = 1.40\ \mu m$

第三次切割：$f = 0.083$ mm，$I = 0.5$ A，$V = 35$ mm^2/min，$R_a = 0.85\ \mu m$

尺寸误差：0.006 mm。

2）用 ϕ0.18 mm 钼丝在 TP－32 机床上加工图 3.5-49 所示 50 mm 厚的零件（材料为 Cr12）。

第一次切割：$f = 0.160$ mm，$I = 3.9$ A，$V = 93.6$ mm^2/min，$R_a = 3.60\ \mu m$

第二次切割：$f = 0.100$ mm，$I = 1.5$ A，$V = 58$ mm^2/min，$R_a = 1.55\ \mu m$



第三次切割：$f=0.093$ mm，$I=0.8$ A，$V=41\ mm^2/min$，$R_a=1.00\ \mu m$

尺寸误差：0.006 mm。

3）用 $\phi 0.18$ mm 钼丝在 TP-40 机床上加工图 3.5-50 所示 60 mm 厚的零件（材料为 Cr12）。

第一次切割：$f=0.160$ mm，$I=4.2$ A，$V=104\ mm^2/min$，$R_a=3.80\ \mu m$

第二次切割：$f=0.100$ mm，$I=1.5$ A，$V=56\ mm^2/min$，$R_a=1.45\ \mu m$

第三次切割：$f=0.093$ mm，$I=0.8$ A，$V=40\ mm^2/min$，$R_a=0.95\ \mu m$

尺寸误差：0.008 mm。

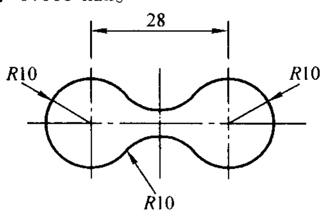


图 3.5-48　$H=45$ mm 试样

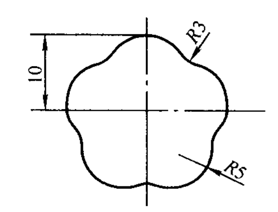


图 3.5-49　$H=50$ mm 试样

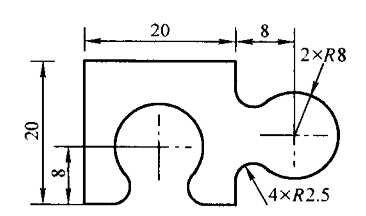


图 3.5-50　$H=60$ mm 试样

4　大厚度工件电火花线切割

厚度在 200 mm 以上的模具以及超大厚度直壁异形零件大量出现，如许多大型注塑模的模芯、注塑模分型面，过去都是采用机械切削方式进行加工，不但浪费大量的模具钢和加工工时，而且凸、凹模之间的配合间隙也很难保证。如采用电火花线切割的方式替代传统的机械切削方式加工就可以从根本上改变这种状况。

目前，无论是高速走丝线切割机床，还是低速走丝线切割机床，一般只能适应加工厚度 200 mm 以下的工件，而当被加工工件厚度超过 200 mm 时，加工稳定性下降，使得加工难以顺利进行。这是因为在线切割加工时，电蚀产物首先抛入极间的工作液中，然后由工作液带出切缝，工作液经过切缝期间，脉冲电源要产生多次放电，前几次放电产生的电蚀产物必然要影响以后的放电过程。因此，工作液必须具有一定的“容纳性”（即工作液中电蚀产物的浓度低于一定值时，工作液能够保持其介电性），以便容纳尚未及时排出的电蚀产物，使稳定性免遭破坏。当工作液中电蚀产物的浓度大于一定值以后，过程的稳定性就会遭到破坏，使加工无法进行。因此，在研究线切割加工速度时，不仅要考虑熔融金属从电极表面抛出，而且还必须考虑电蚀产物从间隙中及时排出。电蚀产物的排出，除了加速电蚀产物在工作液中的扩散外，还需要保持切缝中工作液有一定的流量，随着工件厚度的增加，进入切缝中的工作液迅速减少，造成切缝中电蚀产物难于排出。

在以往的研究中，一方面采取共轴式冲液系统，能在一定程度上增加工件切缝中工作液的流量；另一方面通过改变工作液的成分，也能提高电蚀产物在工作液中的扩散能力和工作液对电极丝的附着力，改变加工稳定性。

我国的研究人员经过长期努力，使线切割所能加工的工件厚度不断提高，到 20 世纪 80 年代初期，在国产线切割机床上，通过采取一定措施，已能加工 300 mm 以上厚度的工件，个别研究人员在熟悉实验室条件后，曾能加工 500 mm 厚度的钢质工件，在国际上处于领先地位。

4.1　切缝中工作液的流动状态

（1）切缝中工作液的流动模型

由于线切割加工的切缝是向后敞开的，而敞开一面基本上被排出的电蚀产物所堵塞，加上工作液运动的方向垂直于敞开的方向，因此可以近似地认为工作液的流动是在环形中的流动。又因为是放电腐蚀加工，在两极的表面上布满了放电腐蚀的凹坑，表面粗糙，而敞开一面是由电蚀产物堵塞，所以工作液的流动是在粗糙管壁中的黏性液体流动。电蚀产物与工作液的混合液在切缝的流动是缝隙流动。只要混合液及时排离前进的缝隙，就对加工没有影响。故排屑只需考虑前进的缝隙。

根据流体力学中对黏性流体从层流向湍流过渡的论述，当雷诺数大于临界雷诺数时，黏性流体的流动由层流转化为湍流。而临界雷诺数取比较保守的值为 2 330，因此，我们根据雷诺数的计算公式，可得出工作液在切缝中的流动状态：

$$Re = vd_e/\nu \tag{3.5-13}$$

式中，d_e 为当量直径，其值为$2(R-r)$；ν 为运动黏性系数；v 为流体的速度。

取电极丝半径 $r=0.01$ cm，切缝半径 $R=0.011$ mm，$v=500$ cm/s，$\nu=0.01\ cm^2/s$，则：

$$Re = 100 < 2\ 320$$

故可以认为缝内流动状态为层流。实际上，在切缝中工作液的流动是非常紊乱的。因为：①进出口过渡段的影响；②放电过程中通道振荡、气泡运动、爆炸力等的扰动作用；③电极丝的振动。因此，缝隙内局部的瞬时流速可能非常高，上面得到的雷诺数只在平均意义上适用。在后面的计算中，仍认为流动是层流状态，以简化计算过程。

（2）压差流动

假设切缝入口与出口之间的压力差为 ΔP，由压差的定义可得：

$$\Delta P = \frac{\rho Vg}{S} h\rho g \tag{3.5-14}$$

式中，ρ 为流体的密度；g 为重力加速度常数；S 为面积；V 为体积，其值如下。

由哈根－泊肃叶（Hagen-Poiseuille）方程可得：

$$h_f = \frac{32 lv\mu}{d_e^2 \gamma} \tag{3.5-15}$$

式中，μ 为液体运动黏性系数；l 为切缝的长度；v 为流体的速度；γ 为重度，其值为 ρg。

由式（3.5-14）和式（3.5-15）得液体的流速：

$$v = \frac{\Delta P d_e^2}{32 l\mu} \tag{3.5-16}$$

由式（3.5-16）得压差流动的流量为：

$$Q_p - vS = \pi(R^2 - r^2)\frac{\Delta P d_e^2}{32 l\mu} \tag{3.5-17}$$



式中，Q_p 为压差流动的流量；S 为管路的界面积。

假设：$R=0.07$ mm　$r=0.06$ mm　$l=100$ mm　$\Delta P=100$ N/m²　$\mu=1\times10^{-6}$ mm²/s（实际情况比此值大）可得：$Q_p=4.6\times10^{-2}$ mm³/s。

实际生产中，水泵的压力真正作用在切缝中的部分是非常少的，这主要是由以下几个方面原因造成的：①液体从水泵出来后，首先经过弯曲的管路要损失一部分；②在喷嘴处转变为射流形式，再由射流喷入切缝中，由于喷嘴与切缝的尺寸相差非常大（喷嘴的直径为 2 mm，切缝的直径大约为 0.14 mm），并且射流的方向与切缝存在很大的角度，因此这将损失水泵能量的很大一部分。实际情况中 Q_p 要小得多。

将以上所假设的各值代入式（3.5-14），得重力产生的压差 ΔP 为：

$$\Delta P=\rho gh=1\ 000\ \text{N/m}^2$$

将 ΔP 之值代入式（3.5-17），得重力产生的压差流量 Q_g 为：

$$Q_g=0.146\ \text{mm}^3/\text{s}$$

由此可见，重力产生的压差流动的流量比水泵喷射产生的压差流动的流量要大 3 倍多。因此在实际情况中，水泵产生的压差流动效果是有限的。

(3) 剪切流动

由于工作液具有一定的黏度，工作液在缝隙流动时，电极丝的走丝运动将带动工作液流动。这种流动的根源就在于流层间的黏性摩擦作用。为了简化计算，在不致太大误差的前提下，可假设工作液在切缝中是均匀的，即液体间的动力黏性系数是一个常数 μ，工作液的流动符合牛顿内摩擦定律。

工作液剪应力 τ 的分布可按图 3.5-51 所示的模型求解。

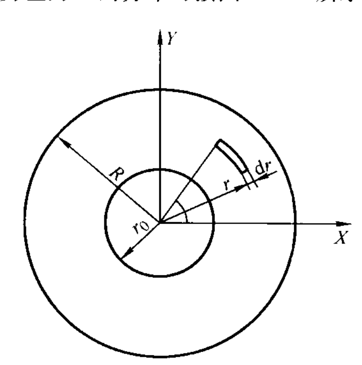


图 3.5-51　工作液力学模型

首先在工作液中取一半径为 r、厚度为 dr、张角为 θ、高度为 l 的弧形微单元体，由于该微元体受力是平衡的，由层流模型可知微元体两侧面剪力的合力等于 0，即$\sum F_z=0$。所以，

$$\sum F_z=\tau r\theta-(r+\mathrm{d}r)(r+\mathrm{d}r)\quad\theta=0 \qquad (3.5\text{-}18)$$

整理式（3.5-18），略去高阶无穷小 dtdr，积分，可得

$$\tau=\frac{C_0}{r} \qquad (3.5\text{-}19)$$

式中，C_0 为积分常数。

由牛顿内摩擦定律：

$$\tau=\mu\frac{\mathrm{d}U}{\mathrm{d}r} \qquad (3.5\text{-}20)$$

将式（3.5-19）代入式（3.5-20），则工作液的剪切流动速度分布 U 可得：

$$\mathrm{d}U=\frac{C_0}{r\mu}\mathrm{d}r \qquad (3.5\text{-}21)$$

对上式两边积分，可得

$$U=\frac{C_0}{\mu}\ln r+C_1 \qquad (3.5\text{-}22)$$

式中，C_0、C_1 为积分常数。

设电极丝以 U_0 的线速度运动，电极丝的半径为 r_0，切缝宽度为 $2R$，则式（3.5-18）的边界条件为：

当 $r=r_0$ 时，$U=U_0$；$r=R$ 时，$U=0$。

将边界条件代入式（3.5-22），可得

$$C_0=\frac{\mu U_0}{\ln(r_0/R)},\ C_1=\frac{-U_0}{\ln(r_0/R)}\ln R$$

将 U_0、U_1 的值代入式（3.5-22），得工作液的速度分布为：

$$U=\frac{U_0}{\ln(r_0/R)}\ln(r/R) \qquad (3.5\text{-}23)$$

(4) 工作液剪切流动的流量 Q_τ

得到工作液剪切流动的速度分布后，通过对速度积分，即可获得工作液剪切流动的流量。在切缝截面上取一半径为 r、宽度为 dr 的微圆环（如图 3.5-52 所示），其面积 d$s=2\pi r$dr，则：

$$Q_\tau=\int_{r_0}^{R}\frac{U_0}{\ln(r_0/R)}\ln\frac{r}{R}2\pi r\mathrm{d}r \qquad (3.5\text{-}24)$$

$$Q_\tau=\pi U_0\left[\frac{r_0^2-R^2}{2\ln(r_0/R)}-r_0^2\right] \qquad (3.5\text{-}25)$$

由式（3.5-25）可得出，工作液剪切流动的流量与切缝长度无关，只与电极丝运动的速度以及切缝的几何尺寸相关，这点与压差流动是不同的。因此切缝越长，则切缝中工作液剪切流动所占比重越大。

假设：$R=0.07$ mm，$r_0=0.06$ mm，$U=10$ m/s，代入上式得：

$$Q_\tau=19.4\ \text{mm}^3/\text{s}$$

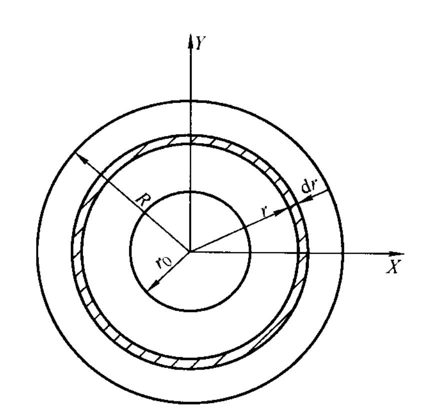


图 3.5-52　切缝中的微圆环

与前面压差流动的流量进行比较，发现剪切流动的流量比压差流动（包括重力引起的流动）的流量要大三个数量级。因此，在高速走丝线切割加工中，基本上是以剪切流动为主，这与实际情况是符合的。在实际加工中可以看到，工作液的流动方向总是随着电极丝运动的方向流动，而并非随冲液的方向流动。

4.2　实现大厚度工件稳定切割的途径

由前分析可知，当工件厚度大于 200 mm 时，由压差流动产生的流量微乎其微，此时切缝中的工作液主要是由剪切流动产生的。随着工件厚度增加，切缝的侧向泄漏量逐步增大，而蚀除的金属量却有所增加，因此工作液中电蚀产物的浓度相应上升。当工作液中电蚀产物的浓度大于某一值时，加工将无法继续进行下去。为了使加工能稳定进行下去，即

必须增大剪切流动的流量。由式（3.5-25）可知，增加剪切流动的流量的途径有两个：一是增大电极丝的运动速度；另一个是改变切缝的几何尺寸。

（1）高速走丝工艺适于大厚度切割

高速走丝线切割机电极丝的移动速度快，有助于把工作液代入加工区，也可以将工作液连同电蚀产物一起带出加工区，因此适用于大厚度切割。目前已有切割 1 000 mm 超大厚度工件的专用线切割机投入市场，并在实践中发挥作用。

在高速走丝情况下，适度增加工作液的浓度和黏度，有助于强化工作液剪切流动的作用，以提高切割加工的稳定性。

（2）适当提高电极丝的移动速度

由式（3.5-21）可知，剪切流动的流量正比于电极丝的移动速度，因而适当提高电极丝的移动速度（走丝速度）对于增大工作液的流量，改善排屑条件是十分有利的。

高速走丝的电极丝移动速度一般为 2～7 m/s，如适当提高到 10～11 m/s，则有利于排屑及提高加工的稳定性。但过高的走丝速度不仅会使电极丝振动增大，影响加工精度，而且还会因频繁往返运动使换向断电时间相对加工时间的比值增大，影响切割效率。

低速走丝线切割机在切割大厚度工件时，走丝速度也需增大，通常要增大到 8～10 m/mim。过高的走丝速度会增大电极丝的消耗，增加生产成本。

（3）扩大放电间隙与切缝

式（3.5-25）还说明，放电间隙与切缝大小与剪切流量密切有关，而且几乎与它们的尺寸大小平方值成正比。因而在切割大厚度工件时，必须设法将放电间隙及切缝扩大。常用的方法主要如下。

1）选用较粗的的电极丝　高速走丝选用 ϕ0.17～0.20 mm 的电极丝，低速走丝选用 ϕ0.30～0.35 mm 的电极丝。

2）增大脉冲放电的能量　增大脉冲电流幅值和脉冲放电持续时间（脉宽）都可以增大脉冲放电的能量。较大脉冲能量放电不仅爆炸力大，迫使电极丝振动而扩大放电间隙；而且较大的脉冲放电能量会使蚀除微粒增大，从而也会扩大放电间隙。试验证明，在大厚度工件切割时如采用 t_{on} = 80 μs 和 I_m = 60 A 的脉冲，单边放电间隙可扩大到 0.03 mm 以上，此刻，切割 1 000 mm 厚的工件仍比较稳定。

3）选用适于大厚度切割的工作液　普通工作液仅适于一般厚度工件切割，而不太适于大厚度工件切割。适于大厚度切割的工作液不仅洗涤性能好，而且放电间隙也大。如航天 502 皂化液就比较适合于大厚度工件切割。而且大厚度工件切割时的工作液浓度和黏度一般都比较高。

4.3　大厚度工件线切割工艺

（1）加工前对机床精度进行检验和调整

加工超厚工件前，对于高速走丝电火花线切割机床工作台的位移精度和走丝系统的动态精度必须进行检验和调整。

1）工作台的位移精度　工作台的灵敏度和位移的重复度。

X、*Y* 坐标丝杠前、中、后、正向、反向用手转动时应轻松自如，不能有轻、有重、有松、有紧。两坐标全行程用 1 级直角尺、千分表来检测，因符合出厂指标。

2）用千分表检验工作台纵、横坐标空程，即一个坐标正向进给 50 个脉冲，千分表应指示 50 μm。然后再反向进给 50 个脉冲，千分表指示应回到起始点。这里正反向位移空程应控制在 1～2 μm 之内，空程越小，位移精度就越高。决定这个指标的关键部分是丝杠副的间隙和步进电机变速过桥齿轮的啮合程度。

3）走丝系统　储丝筒正反向径向跳动量不大于 0.01 mm。轴向窜动量不大于 0.03 mm。导轮 V 形槽面径向跳动量不大于 4～5 μm。走丝机构传动的平稳性（在加工区上导轮、下导轮用千分表检查）不大于 4 μm。上述检查合格后绕上电极丝，调整电极丝垂直度，开机运转，丝速 8～11 m/s，以 10 倍显微镜观察应看不出电极丝抖动或位移。

4）走丝系统运行时往往会带来机械振动，并会通过丝架的上下臂放大，使加工区的电极丝产生很大的抖动。用两只千分表分别顶在上丝架导轮处纵槽两面上，然后开机使电极丝运转，两表指示在 1 μm 之内为合格。

（2）工件装夹与调整

大厚度工件虽厚度很大，但尺寸一般都不太大，装夹时一定要注意稳定可靠，并保证满足下列要求：

1）厚工件与坐标工作台的坐标的一致性，即工件上下面切割的进给速度应一致；

2）调整上下线架的跨度，使上丝架靠近工件的上表面（相距 5～10 mm）；

3）调整电极丝与工作台面的垂直度，通常用适合于所需加工工件厚度的大型角尺或垂直度检验块来校正。

（3）参数选择

1）电极丝选择

① 材质　最好选用 W20M。合金电极丝比纯钼丝使用效果好。

② 丝径　ϕ0.17～0.20 mm。不宜太细，也不宜太粗。

③ 张力　8～10 N，比普通厚度切割时高出 10%～20%，以减小放电时的电极丝空间形位变化。张力太大，不仅易断丝，还会降低导轮及轴承的使用寿命。

2）乳化液工作液

① 型号　选用适合于大厚工件切割的工作液。如航天 502-1 型。

② 浓度　用水稀释成 15%左右的浓度。

③ 喷液方式　采用共轴式螺旋喷嘴，使工作液喷成圆柱状包住电极丝，上下都设一个喷嘴。

3）电参数

① 脉冲电源开路电压应在 80～120 V 之间。电压太低，切割速度太慢；太高由于乳化液介电强度低，造成击穿，电极丝易被烧断。此外，电压太低，放电间隙小，工作液进入切割区有困难，电压升高到 140 V 以上，放电间隙几乎不再增加，工作液进入切割区和排屑作用并不能继续得到改善，因而有害无益。

② 脉宽应在 40～80 μs 之间。脉冲能量太小，无法加工；太大，加工精度和光洁度下降。脉冲宽间隔比可视加工电流大小而定。脉冲宽间隔比太大，切割速度下降，太小，容易引起微短路。

③ 脉冲峰值电流应在 30～60 A 之间，加工电流 2～4 A，这时加工精度和光洁度较为理想。

④ 进给速度　用示波器观察，短路波形应多于空载波形，即加工波形浓重，短路波形次之，空载波形淡薄。一般在调节时采用稍微偏短路为宜，这样有利于遏制电极丝振动，减少加工中可能产生的空间形位变化，提高加工表面质量。

（4）工艺措施

1）在切割引入程序段时，采用较低的丝速（8 m/s），待切割引入程序段快结束时，提高丝速，改善排屑条件，以便稳定加工。

2）在切割引入程序段时，脉冲能量应适当减少。在大厚度切割时，可采用增大脉冲能量，快速切进去，然后适当减少脉冲能量，以利于稳定加工。但在超厚件切割时采用这种方法可能是有害无益，因为大的脉冲能量将会引起电极丝



强烈振动，电极丝很容易烧断。小脉冲能量切割可减少电极丝振动，对电极丝恰是一个老化过程。待切割引入程序一大半时，逐步加大脉冲能量到规定值，丝速也提高到 11 m/s，便能很快稳定加工，从而避免了切缝多次改变方向和切缝封闭的麻烦。实践证明这种方法是行之有效的。

4.4 大厚度工件切割实例

（1）厚度为 450 mm 的“八极磁悬浮”加工

电极丝：ϕ0.18 mm，丝速 11 m/s；

脉宽：t_{on} = 30 μs；t_{off} = 150 μs；

峰值电流：i_e = 18 A，加工电流 I = 2.1 A；

介质：航天 502－1 号乳化液，浓度为 12%；

切割速度：V_{WA} = 49.6 mm²/min（DT4 材料），V_{WA} = 51.6 mm²/min（Cr12MoV 材料）；

加工结果：积累误差 3 μm，公差均在要求范围内；

粗糙度：R_a = 1.97 μm（最大点 R_a = 2.3 μm，最终点 1.67 μm，平均值 1.97 μm）。

（2）厚度为 610 mm 的模套芯加工（参见图 3.5-53）

材料为 H62，要求光滑连接。

所用的电极丝为 ϕ0.18 mm 的钨钼丝，走丝速度 11 m/s；脉宽 40 μs；脉冲间隔 160 μs；脉冲峰值电流 18 A；加工电流 2.7 A，工作液为航天 502－1 号乳化液，浓度为 10%。切割时加工速度 91.6 mm²/min，加工表面 R_a2.4 μm。

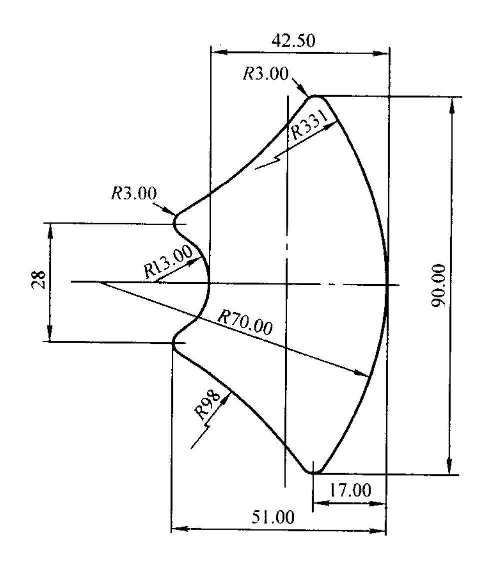


图 3.5-53　模套芯大厚度切割

5 电火花线切割加工工艺应用实例

5.1 冲裁模加工

（1）工艺路线

无论是加工凸模还是加工凹模，都必须准备模胚，然后再进行电火花线切割加工，其基本工艺路线如下。

1）下料　用锯床割断所需材料，包括需切割的材料。

2）铸造　铸造出所需的形状和尺寸，并改善其内部组织。

3）退火　消除铸造后的内应力，并改善其加工性能。

4）模胚粗加工　刨或铣模胚上下面和四个侧面，并留有 0.5 mm 左右的加工余量。

5）模胚精加工　用平面磨床磨上下面和四个侧面，表面 R_a0.63～0.25 mm。

6）划线　钳工按图纸划出坐标位置线。

7）攻丝打孔　按图纸要求攻丝和钻孔（包括穿丝孔）。

8）热处理　按图纸要求淬火。

9）磨上下面　磨去模胚上的氧化膜，并消除热处理变形影响（凹模除上下之外，还需磨四个侧面）。

10）电火花线切割　按图纸要求编程，并加工出所需模具（凸模或凹模）。

11）模具精修　模具光整加工，保证刃口锋利。

（2）加工顺序

冲模一般主要由凸模、凹模、凸模固定板、卸料板、侧刀、侧导板等组成。

线切割加工时，加工顺序的原则是先切割卸料板、凸模固定板等非主要件，然后再切割凸模、凹模等主要件。这样在切割主要件前，通过对非主要件的切割，可检验操作人员在编程、制造靠模或绘制光电跟踪放大图过程中是否存在错误，同时也可检验机床和控制系统的工作情况，发现问题，可及时纠正。

如用圆柱销将固定板、凹模、卸料板组合起来，可进行一次加工，这要求冲裁的材料厚度最好在 0.5 mm 以下。如果在 0.5 mm 以上，凹模与卸料板可一起切割，凸模和凸模固定板应单独切割。组合线切割的优点是：固定板、凹模、卸料板孔形尺寸一致，保证了与凸模间隙配合一致的同时还节省了加工时间。

（3）加工实例

1）数字冲裁模凸凹模的加工。如图 3.5-54 所示。材料为 Cr12MoV，HRC 为 55，H = 30 mm，凸凹模与相应的凹模和凸模的双面间隙为 0.02 mm，表面粗糙度 R_a = 1.02 μm。

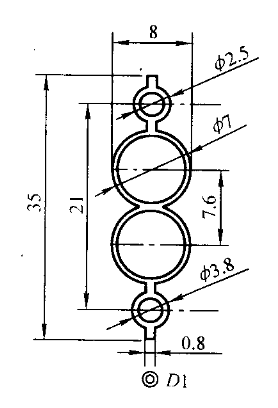


图 3.5-54　冲裁模加工

因为凸凹模图形略为复杂，为了满足工艺要求，采用了以下措施：①淬火前在工件胚料上预制了相应的穿丝孔；②考虑模具使用寿命，将所有非光滑过渡的交点用半径为 0.1 mm 的过渡圆弧连接；③先切割 2 个 ϕ2.5 mm 小孔，再由辅助穿丝孔位开始，进行凸凹模的成形加工；④合理选择电参数，保证加工粗糙度、精度和配合间隙。

加工时采用高速走丝数控线切割机床，WC-1805A 脉冲电源。电参数为脉宽 t_{on} = 1 μs；t_{off} = 4 μs，工作液为航天 502－2 号乳化液，浓度为 15%，电极丝为 ϕ0.12 mm W20Mo，加工结果如下：加工速度 21.6 mm²/min，R_a = 1.02 μm。通过与相应的凸模、凹模的试配，可直接使用。

2）大中型冷冲模加工实例如图 3.5-55 所示。工件材料为 Cr12MoV，凹模工作面厚度为 20 mm。该凹模图形行程长，重量大，厚度高，去除金属量多，为保证工件的加工质量，采取如下措施。

① 因工件外形尺寸较大，虽然选择了淬透性好、热处理变形小的高合金工具钢，但热处理变形问题的存在不可低估。为了保证孔位置的硬度及减少热处理过程中产生的残余

应力，除热处理工序应采取必要的措施外，在淬硬前还应增加一次粗加工（铣削或电火花切割），使凹模形孔诸面留 2 mm 左右的加工余量。如图 3.5-56 所示。

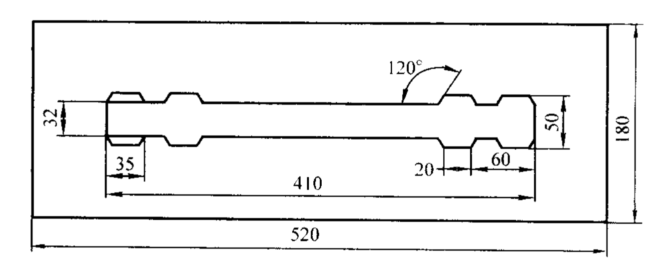


图 3.5-55 散热器片凹模

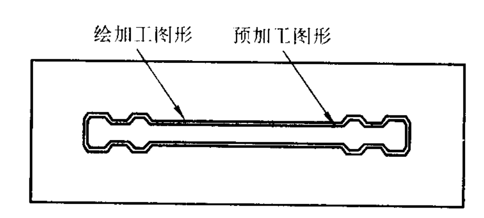


图 3.5-56 散热器片凹模二次加工

② 加工时采用双支撑装夹方式，利用凹模本身架在两夹具的定位面上。

③ 在切割过半，特别是快完成加工时，废料易发生偏移和位移，而影响加工精度或卡断电极丝。为此，在工件和废料块的平面上，添加一块经过磨削的平面永久磁钢，以利于废料在切割全过程中位置固定。

④ 在数控线切割机床上进行加工。用 WC-1805A 脉冲电源，脉冲参数 $t_1 = 1\ \mu s$；$t_0 = 4\ \mu s$；工作液为航天 502－2 号乳化液，浓度为 15%；电极丝为 W20Mo，$\phi 0.13$ mm。加工结果：$R_a = 1.05\ \mu m$，加工速度 $V_{WA} = 23\ mm^2/min$；光洁度和精度均符合要求。

3）电机转子复式冲模凹模加工实例，如图 3.5-57 所示。鉴于加工图形圆周等分，用光电跟踪或靠模加工，只需要一个齿形，利用机床附件中的旋转夹具或圆周定位孔来实现旋转加工。用自动编程只要编一个齿形，利用旋转功能可以切割出圆周 12 等分的齿形，加工更省事。但 12 个穿丝孔应在 1 个圆周上，等距离，最好用坐标镗加工。

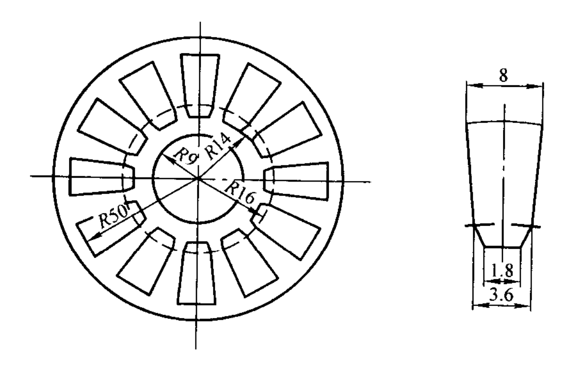


图 3.5-57 12 齿电机转子复式冲模凹模

5.2 一次同时加工出凸模与凹模

利用斜度线切割功能一次同时加工出凸模和凹模。图 3.5-58 表示出一次加工出凸模凹模的基本方法。

（1）倾斜式加工

图 3.5-59 是采用倾斜式加工法一次加工出凸模凹模的方法。这种方法切出的凸模的切削刃面上，基本上没有切缝的缺陷。

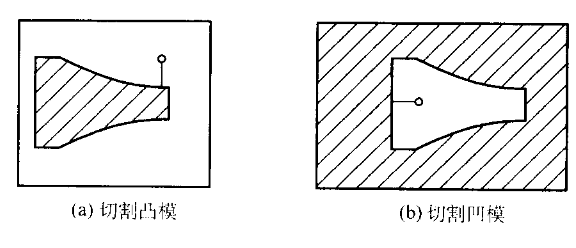


图 3.5-58 一般凸凹模的一次加工法

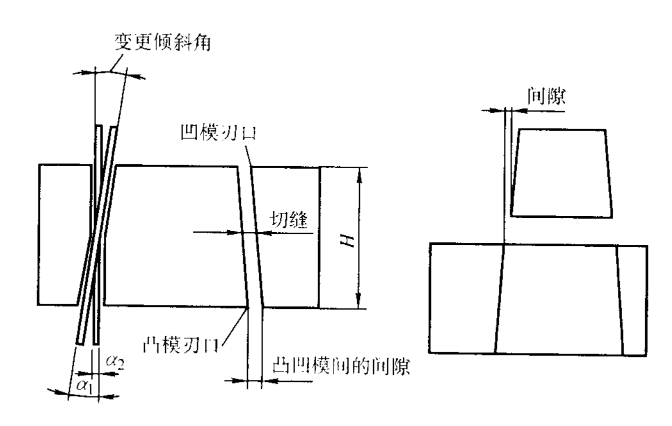


图 3.5-59 采用倾斜法一次切割凸凹模

加工时从倾斜 α_1 的起点孔开始，则倾斜角的变更量 α

$$\alpha_2 = \arctan \frac{f-\varepsilon}{H} \tag{3.5-26}$$

式中，H 为凹凸模模胚料的厚度；α_2 为倾斜角度；ε 为凸凹模单边间隙；f 为切缝宽度。

打好倾斜孔，凸模胚料在热处理前加工出脱模销插孔，热处理后（尺寸变化后），让凸模把模座（非淬火材料）与基准面对合，把凹模胚料的脱模销孔的位置和尺寸对合，能与凸模把和模座在一起进行加工。凹模胚料利用斜度线切割机进行加工，把切掉下的凸模和凹模利用脱模销分别固定到凸模把和凹模座上。除接口处进行研磨以外，凹凸模便一次加工成形。

（2）简易加工法

简易加工法如图 3.5-60 所示，就是凸模或凹模非加工区打一个穿丝孔，凸凹模间隙由倾斜角度确定，斜角 α_2 同样可由式（3.5-26）确定。

凸模模柄与凹模模座组合对准好位置，便可进行加工。这种加工方法简便，缺点在于，如果在凹模外边打孔，凹模上不仅有一条切缝，而且影响模具寿命。反之在凸模上也有一条缝。孔的位置最好选择在一侧非重要位置。

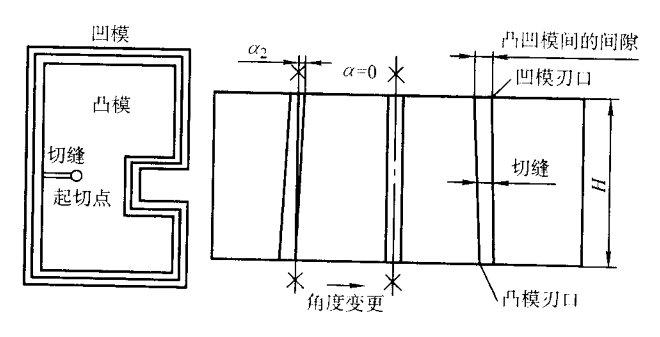


图 3.5-60 采用简易法一次切割凸凹模

(3) 加工实例

图3.5-61所示为一次切割凸凹模的加工实例。材料：Cr12MoV，$H = 20$ mm，电极丝 $\phi0.12$ mm。凸凹模单边配合间隙为0.01 mm，冲制材料为0.10 mm铜皮，倾斜角为0.5°。冲制15 000件均合格。

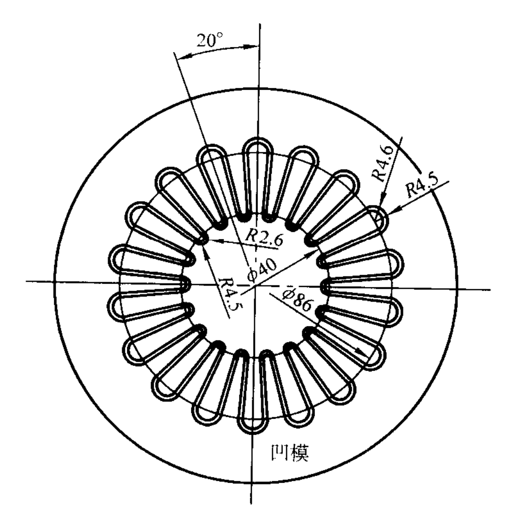


图3.5-61　凸凹模一次加工实例

5.3　超行程工件的加工

在实践中，有时会遇到加工区尺寸超出机床工作台行程的情况，这时无法用常规的方法进行编程，但只要充分利用机床本身的各种功能，仍然能加工出保证精度的工件。

(1) 移位校正加工法

1) 标准块规法　如图3.5-62所示，一个一级精度90°宽平角尺（规格是250×350）内直角的两个边，分别与机床工作台 X、Y 坐标用千分表校平直，然后用压板螺丝固定在工作台上。其放置的位置是：角尺的内角底边与工作台 X 坐标平行，内直角边在工作台边缘与 Y 坐标平行。选用适当的块规作移位校正用。块规大小视工件大小来选择，一般为工件需要加工的行程距离减去机床的行程距离，再加10～20 mm余量。目的是为了防止丝杠两头精度不高，找一块尺寸大致相同的标准块规，放在工作台上，块规的一个平行面与内直角边平行靠紧，块规的另一个平面与工件预先磨好的90°基准面平行靠紧，松紧适当，把工件再用压板螺丝照图3.5-63固定在工作台上。取下块规，再穿电极丝校孔进行加工。加工到行程预先计算好的地方，停止加工，卸掉工件上的压板螺丝，不能动卸角尺压板，将工件平移，工件的基准端面与角尺的内底角边平行靠紧，固定工件。同时电极丝也向角尺方向平移一个标准块规的距离，然后继续加工。这种标准块规移动法平移加工的工件精度是基本上不变样的。没有块规，可用线切割方法切一个标准块来代替。

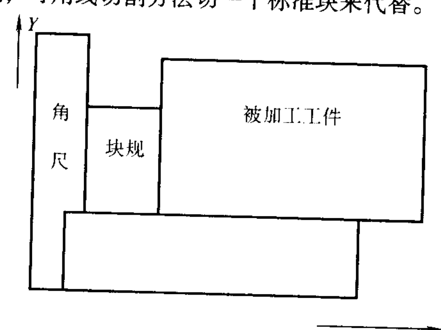


图3.5-62　标准块规移动加工示意图

2) 标准板上的孔距校正移位法　如图3.5-63所示，找一块板加工出基准面，并磨平。将工件与标准板上镗出 A、B、C、A'、B'、C' 等6个孔，也可用钻头钻孔。工件淬火后，孔进行研磨，并配销钉四根。首先固定标准板上的 B、B'、C、C' 孔。加工完毕后，停机，拔出销钉。标准压板不动不卸，平移工件将 B、B'、C、C' 四孔的销钉插人标准压板上的 A、A'、B、B' 四孔内，继续加工直到结束。

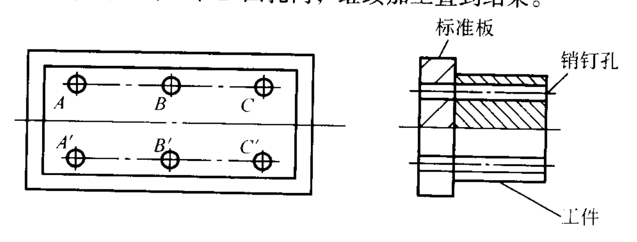


图3.5-63　镗孔定位移动法

(2) 同心旋转定位法

对于圆形的工件，超出机床加工范围时，可用旋转轴象定位法或分度法来进行加工。

1) 外圆定位法　图3.5-64是以加工件外圆顶进行加工的。

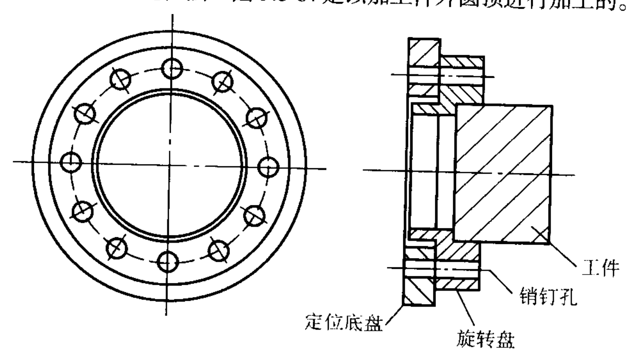


图3.5-64　外圆定位法示意图

① 将定位底盘与旋转盘装卡在工作台上，有一个加工区在 X、Y 两坐标有效行程内即可。

② 用千分表或百分表将磁力表架吸在线架上，将表针顶在旋转盘上，用手拨到旋转盘，调到同轴度小于0.01 mm即可，用压板将定位底盘固定。

③ 将工件装在旋转盘上，用表针顶住工件，使工件与旋转盘一块转动，同轴度小于0.01 mm即可，将工件与旋转盘固定。

④ 插上三个销钉，加工第一个位置，加工完后再转动一个 。依次类推。销钉孔多少视工件大小和分度要求而定。加工时三点定位即可。

2) 内圆定位法　如图3.5-65所示，以加工工件内圆定位。步骤与找正校正方法同上。

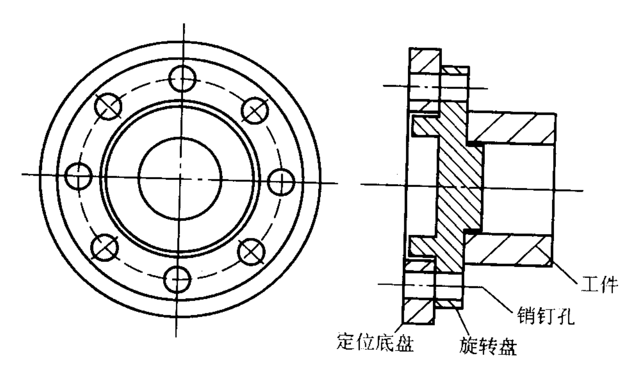


图3.5-65　内外圆定位法示意图



对于一些要求不太高的零件可采用组合加工法，将一件工件分成数件加工，然后用一块固定板固定在一起。

(3) 超行程工件加工实例

图3.5-66所示零件的外圆轮廓作为基准面，直径为 ϕ513 mm，内孔直径 ϕ400 mm，要求在半径 R231 mm 的圆周上均匀加工出40个12 mm×12 mm的方孔，分度误差为1，方孔尺寸为12 mm±0.01 mm。而现有机床工作台的行程为300 mm×450 mm，已小于加工区最大尺寸。这样就需要解决下列问题：找出圆心，定基准，并使多次装夹切割后，方孔分布的均匀性得以保证。

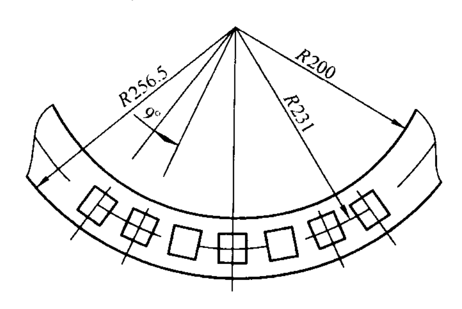


图3.5-66 超行程工件

1) 工件的装夹　用内六角螺钉替代机床工作台上的定位销，将两个螺钉销外移到工作台适当位置定位，使工件大约1/3的部分落在可加工段内，而其余部分落在工作台上，使在长时间加工中工件稳定。

2) 圆心找定（见图3.5-67）　首先，用钳工画线方法在直径处用螺钉担一横梁（螺钉也开在工件的定位销孔处），横梁尺寸稳定。垂直尺寸不大为宜，在中心处钻一预孔。然后将工件固定在工作台上，利用机床的边自动定位功能，记下 P_1，$P_2 \cdots P_n$（$n>10$）各点的 X、Y 坐标值。将此组数据输入三坐标测量机，利用三坐标测量机的模拟测量功能，测出圆心坐标。如无三坐标测量机，也可用计算机或人工算出圆心坐标。用此数据将电极丝移到圆心处，用多次切割加工出一个 ϕ8 的基准孔 O。

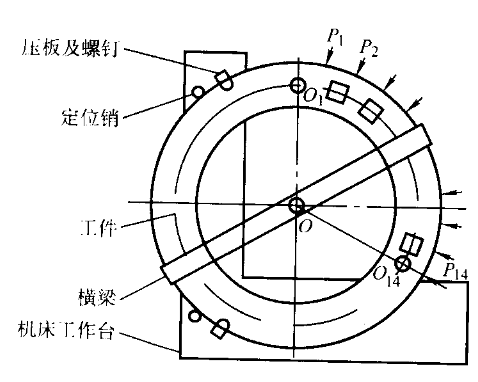


图3.5-67 工件装夹示意图

3) 加工步骤　当安装适当时，每次装夹可有14个孔落在可加工区段内，这样只要经过三次装夹就可以完成加工。实践中，第一次顺时针方向加工了14个孔，但不是都加工成方孔，而是将第一个孔 O_1 与第14个孔 O_{14} 用二次切割加工成8的圆孔，作为下一步加工的基准孔。这样无论第二次是顺时针还是逆时针将工件旋转约120°，都可以利用工件圆心 O 及 R231 上的基准孔 O_1 或 O_{14}。通过圆心自动定位，找出各个基准孔的中心，以其连线 O_{10} 或 O_{140} 作基准轴，通过程序旋转功能进行下一步的加工。这种加工的分度误差控制在±0.01 mm之内。该零件是由大连理工大学用日本三菱DWC110G型机床加工的。

5.4 锥度零件的加工

在具有锥度切割装置的机床上，可以实现锥度零件的加工，加工类别及部位见表3.5-8。

表3.5-8 锥度零件加工

零件类别	加工部位
高速冲模	阴模壁微量斜度
成形刀具	后角
塑料模具	拔模斜度
硬质合金拉丝模	后角
异形零件	各种圆锥、方锥

(1) 锥度切割的基本原理

当前有些用户有锥度切割加工结构线气割机床，但往往放弃斜度切割，其原因可能是认为加工复杂难以掌握，切割出带斜度零件的尺寸达不到要求。其实只要正确测量二线架闭合高度 H 和下线5中心到平台基面高度 h，加上确定的斜度角 α，就能确定加工出带锥度的工件。这里简单地叙述锥度切割的原理以及如何获得二线架闭合高度 H 和下线架中心到平台基面高度 h。

如图3.5-68所示，电极丝 AA_1（即二导轮中心距 H），如果作以 A（下导轮中心点）为原点，A_1 为动点，半径为 l 的倾斜旋转运动，可以得到一个尖倒圆锥体，它在 h 高度基面（即下导轮中心到平台基面）产生一个以 L 为半径的圆周轨迹，与此同时，电极丝作为以 L 为半径，方向与 l 相反的圆周运动（平动）。

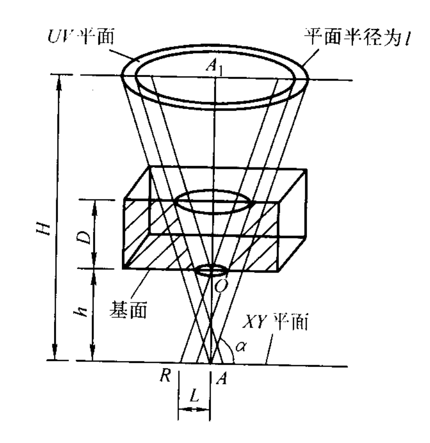


图3.5-68 锥度切割原理

把倾斜运动和平动叠加，就能得到以基面 O 为原点且满足锥度为 α 的尖倒锥体。如果要得到一个斜度为 α，上大下小，且小端半径为 R 的倒圆锥体，只要使 XY 平面做 L 为半径的圆周运动，AA_1 作斜圆周运动，此二运动联动就能获得这个倒圆锥体，在 UV 平面上有 l 为半径的圆周运动。注意：这里 L 是用以抵消做锥度倾斜运动在 h 基面高度上产生的偏移量，因而，与这个偏移量相反。用户只要知道 H、h、α 三个量（这个是锥度切割的三个要素），正确地切割编程，由电脑实现联动切割，就可完成锥度的切割加工。

进行斜度切割编程的步骤。

1) 按照通常切割的方法处理。

2) 当进入"加工开关设定窗"，正确点击加工方向键，必须使人工选择路径的方向与电脑显示的方法一致，如果不同，须正确点击电脑>或<，使其一致。

3) 点击锥度设定ON，弹出斜度、标度、基面，正确填

写当前的标度（二导轮中心距 H）、基面（下导轮中心到刃口距离 h），这里基面的概念已引申为下导轮中心到平台面加上平台面到刃口面距离。

编程时，"斜度"的数值应根据切割单面斜度角而定，正负号作如下规定：要得到上大下小锥度符号为正，上小下大锥体符号为负，切忌不能错用。一般锥度切割，建议采用上小下大顺锥体切割，这样做的好处是：无需将圆纸形腔正反颠倒作圆，使用方便，直观；而且切割完毕时，工件落下不会将钼丝夹住造成断丝。

4）以后的编程步骤按一般的切割编程的方法处理即可。进行斜度加工时，一旦掌握 H、h 的测量方法，再注意斜度三要素的正确使用，就能切割出有斜度工件。

（2）锥度导轮闭合高度及基面测定

1）分析　如上所述，斜度加工是基于 XY 平面与 UV 平面的联动来完成的。XY 平面是指大滑板带动工件作平动运动。如图 3.5-69 所示。UV 平面是上线架端点 A_1 围绕下线架端点 A 作倾斜运动。在作倾斜运动时，A_1 移向 A'_1，造成平台基面上产生与 l 方向一致的 L 量偏移，这就必须在钼丝平移时及时叠加一个 L 量，它由 XY 平动运动来实现，且方向与 l 相反的量，才能保证在倾斜运动时，电极丝与基面工作点 O 不偏移。显然平动运动是以 L 做平动量和 UV 平面以 l 量做倾斜量合成，才能切出符合要求的斜度切割的零件。因而在切割斜度时，必须获知上下线架两端点闭合高度 H 和下导轮端点 A 到平台基面的高度 h 及单面的斜角，这三个参数才能实现锥度加工。

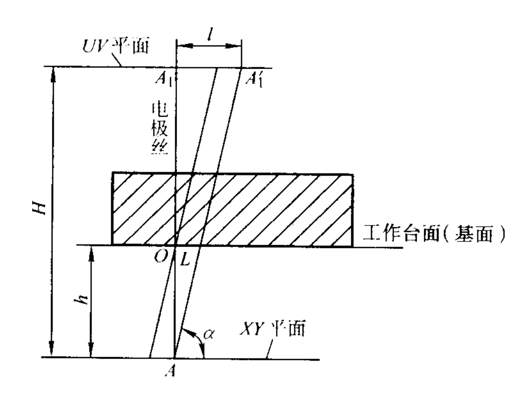


图 3.5-69　偏移量补偿

为了确保斜度切割精度，必须对线架二导轮中心距离及基面尺寸作正确测定。通常由于受测试工具局限，无法精确测定此二参数，故而采用下述间接测试法，用来满足基面及线架闭合高度的测定。

试割一个 2 mm × 20 mm 单面斜度 l 锥体，如图 3.5-70 所示。锥体为上大下小（上小下大），尺寸为 X_1 和 Y_1，工件厚度为 D，如图 3.5-70 所示，用投影仪或分厘卡仔细测定 X_1，X_2（或 Y_1，Y_2）值备用。

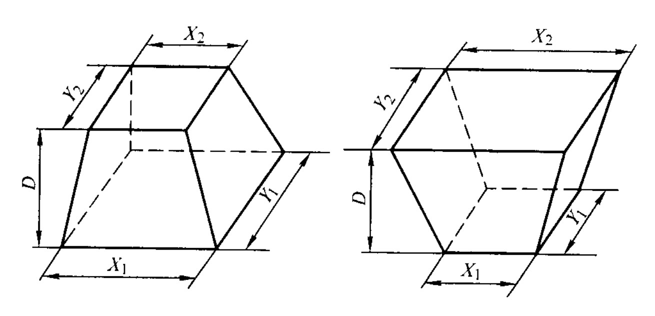


图 3.5-70　锥度切割计算

H 为二导轮中心距离的估算值，h 为下导轮端点到平台基面的高度估算值。此二值是未切割锥度时，估算测定，仅作为锥度加工产生 l 的依据。通过对切割件 X_1、X_2、D 测量经计算就可以获得实际切割的 α。

2）计算

① 中间量 $\tan\alpha$ 和 δ 的计算

$$\tan\alpha = (X_2 - X_1)/2D$$

说明：$\tan\alpha$ 是以锥度切割的三要素 H、h 和 l 为依据，经切割获得的实际的正确值。上大下小：$X_2 - X_1$；上小下大：$X_1 - X_2$

$$\delta = (\text{标准值} - X_1)/2$$

说明：对于本例中，δ 是 20 mm 与实际测量得到 X_1 的差值。

② 二导轮中心闭合高度 H 的计算

$$H = (H\tan)/\tan\alpha$$

注意：$H\tan$ 是锥度切割小拖板 A 倾斜半径偏出量，根据这个偏出量，锥度切割产生 $\tan\alpha$ 量，由此推出 H 值。

③ 基面高度 h 的计算　在基面（形腔面）上切割的图形尺寸应符合名义尺寸的要求，由于 h' 为 H 和 h 的估算值，切割将是形腔基面的图形尺寸与真实尺寸产生一个误差值 δ

$$h'\tan l = h\tan\alpha + \delta$$

说明：$h'\tan l$ 是预设值，$h\tan\alpha$ 为实际量，δ 为误差量。

讨论：假如 $h' = h$，应有 $\delta = (\tan l - \tan\alpha)/h$，所以当测出 δ 值，经计算满足上式值。当 $\alpha \neq l$，$\delta \neq (\tan l - \tan\alpha)/h$ 时，可知 $h' \neq h$。则有 $h = (h'\tan l - \delta)/\tan\alpha$，$h$ 高度可直接通过上述计算获得结果。

3）结论

① H 和 h 算式的确定

$$H = H'\tan l/\tan\alpha \qquad (3.5\text{-}27)$$

上大下小：
$$h = (h'\tan l - \delta)\tan\alpha \qquad (3.5\text{-}28)$$

上小下大：
$$h = (h'\tan l + \delta)/\tan\alpha \qquad (3.5\text{-}29)$$

② 为减小计算量，可预设 $h' \neq h$，这样就无须进行 $\delta = (\tan l - \tan\alpha)/h$ 的讨论，直接计算式（3.5-28）和式（3.5-29）可得 h。

③ 上面的式（3.5-28）和式（3.5-29）是针对上大下小和上小下大两种场合，须根据实际情况来使用。

4）注意事项

① 切割锥度前，要保证机械精度符合规定要求。

② 电极丝的放电间隙，应做到心中有底，保证有合理的间隙补偿量，不干扰切割斜度的精度。

③ 仔细参阅斜度切割编程说明，切割走向与电脑设定走向一致，在此前提下，如果要切割上大下小尺寸在基面，斜角度应为 $+\alpha$，反之上小下大尺寸在刃口面上，斜角为 $-\alpha$。

④ X_1、X_2、Y_1、Y_2 的测量精度将直接影响 H、h 实测精度，最好采用投影仪、分厘米卡。

（3）应用

1）带斜度的石料粉末冶金模具　此模具由凹模及压头组成，材料均为硬度合金。凹模尺寸如图 3.5-71 所示，高度为 100 mm，斜度为 2′24″。用带锥度装置的线切割机床，加工粗糙度 R_a = 0.611 mm，直线度 3 mm，尺寸误差0.006 mm。

加工时间：凹模切割 250 min；

圆柱外形及三个压头切割 208 min。

调整时间：12 min。

2）复杂异形挤压模　有一副典型的上下异形模具，挤压模入口处为 40 mm 的圆，出口处为梅花形，外接圆直径 38 mm，高度为 250 mm，整个加工时间为 19 h。

3）成形刀具的切割　常规的磨削工艺需要与刀具形状

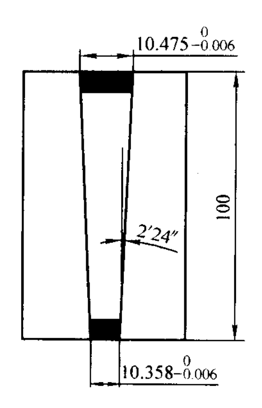


图 3.5-71 粉末冶金模

相适应的成形砂轮并要经常进行休整，复杂形状很难加工。采用带有锥度切割装置的电火花线切割机可以很方便地加工内圆角半径小于 0.02 mm 和宽小于 0.04 mm 的成形刀具，后角可用锥度切割实现。经过一定程度的处理，还可以加工变斜度的刀具。

5.5 零件加工实例

(1) 加工电火花成形工具电极

电火花线切割加工适合加工各种材料（紫铜，石墨，铜钨合金等）的形状复杂或微细的工具电极，并能达到所需的尺寸精度和表面粗糙度。图 3.5-72 所示的石墨电极，线切割编程时间约需 2.5 h，而切割时间为 14 h。

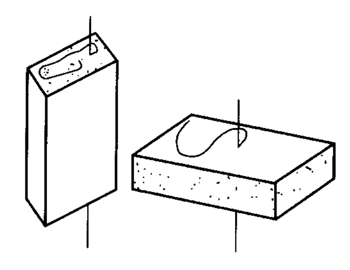


图 3.5-72 电火花成形工具电极

(2) 加工微小零件

两个小零件见图 3.5-73，切割时采用 0.03 mm 的钨丝，工件材料为 0.5 mm 厚的 INOX 不锈钢，加工精度为 ± 5 μm，表面粗糙度 $R_y = 2 \sim 3$ μm，最小圆角半径为 0.02 mm，较大件的工时为 18.6 min，较小件的工时为 3.6 min。

对于如图所示薄片状的零件，可将板材叠在一起，一次切出多个零件，经济性好。

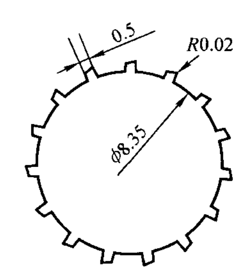


图 3.5-73 微小零件

(3) 异形孔喷丝板的加工

异形孔喷丝板的孔形特殊、细微、复杂，见图 3.5-74。图形外接参考圆的直径在 1 mm 左右，宽为 0.08 ~ 0.12 mm。孔的一致性要求很高，加工精度为 ± 5 μm，表面粗糙度 $R_a < 0.63$ μm。

为保证高精度和高表面质量，加工中应采取下列措施。

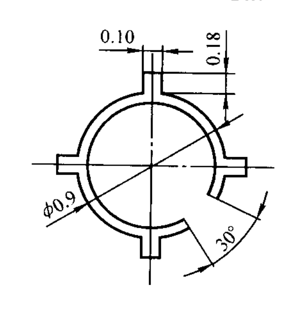
1) 加工穿丝孔，利用精密电火花机床将紫铜电极或铜钨合金电极用修正块修到 0.07 mm 左右，在该机床上打出穿丝孔，要求该孔的 $R_a < 0.63$ μm，椭圆度小于 2 μm，不垂直度不大于 5 μm（在 0.5 mm 高度内）。穿丝孔在异形孔中的位置要选择合理，一般选在窄缝交汇处。

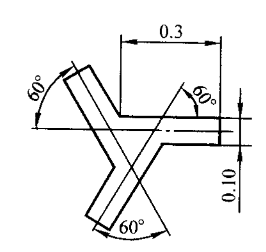
2) 采用窄脉宽小能量加工，一般 $t_i = 0.5$ μs，$t_a = 1.5$ μs，加工电流在 0.1 ~ 0.2 A 之间，当电极丝退出轨迹与进给轨迹重复时，应当切断脉冲电源，使得异形孔诸槽一次加工成形，以保持缝宽的一致性。

3) 选用直径为 0.05 ~ 0.08 mm 的 W20Mo 电极丝。

4) 走丝速度应低，约为 1 ~ 2 m/s。

5) 储丝筒应运转灵敏，利用宝石限位器保持电极丝运动的位置精度。





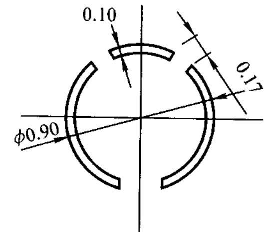
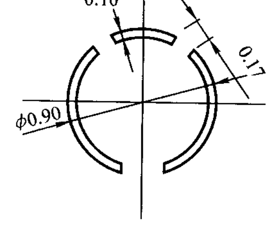



图 3.5-74 异形孔喷丝板

(4) 回转端面曲线型面的加工

回转端面曲线型面的加工任务在正弦曲线变化的十字接头及波浪弹簧片等试制产品中经常遇到。利用一个回转工作台，并对线切割机的丝架进行适当的改装，即可切割这类曲面。如要在端面加工出按正弦曲线变化的曲面，可使用回转工作台的转动（绕水平轴旋转）和原机床工作台 X 方向拖板的转动互相配合来加工，如图 3.5-75 所示。

将回转工作台的旋转轴线按水平位置安装，在原丝架上附加一个小丝架，以便使小丝架上的小导轮能伸进工件的内孔中去，从而使电极丝一直作单壁上加工，避免出现加工波谷面时碰到另一面波峰的情况。加工时原线切割控制台的 Y 轴步进电机的四根控制线改接到回转工作台的步进电机上，这样程序编制要以极坐标代替直角坐标，按正弦曲线规律计算编出的程序输入控制器即可进行加工。加工时工件绕水平轴沿一个固定的方向旋转，同时按正弦曲线规律的要求沿 X 轴的正向或负向移动，工件旋转一周即可切割出一个工件。用这种方法加工出的压制波浪形弹簧片的模具见图 3.5-76，其他按螺旋线、等加速或等减速变化的端面曲线也可用这种装置加工。

(5) 弹性零件

在精密机构中经常会遇到微位移和精密定位等设计。近来配用压电驱动器的弹性铰支机构已得到广泛应用，而线切



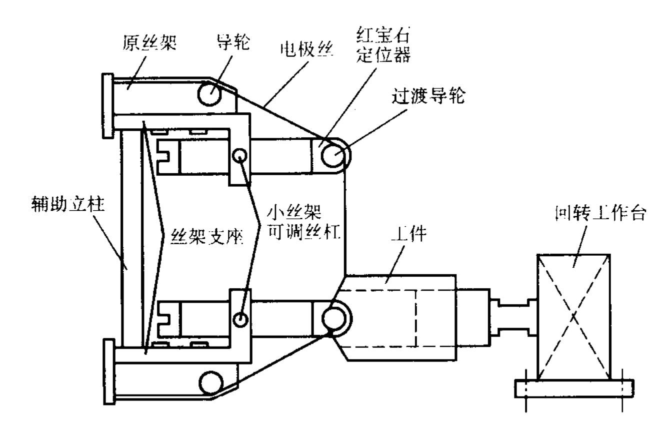


图 3.5-75　加工回转端面曲面示意图

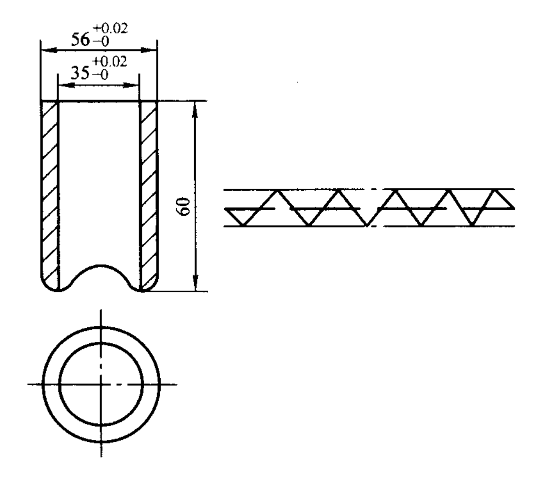


图 3.5-76　波浪形弹簧片模具

割是其主要的加工方法。

一个用作计量工具的弹性工作台见图 3.5-77。工件上孔槽分布密集，成形后的连接部位很少，构成弹性件。其上 26 只孔的尺寸精度和表面粗糙度要求分别为 ϕ（6 ± 0.02）mm 和 R_a1.25 μm，孔间距尺寸精度为 0.01 mm。按常规顺序加工，容易因弹性变形而影响正在加工的孔精度，而且极易形成短路，考虑到各条槽宽没有要求，所以采用了孔、槽分别加工，先用多次切割方式加工多孔，保证了孔径尺寸、表面粗糙度和孔距要求。然后加工各槽，加工槽时根据工件可能弹性变形的情况，边加工边粘接固定，这样不但能达到图纸要求，而且提高了加工效率。该零件是用苏州电加工机床研究所研制的 DK7625 型低速走丝机加工的。

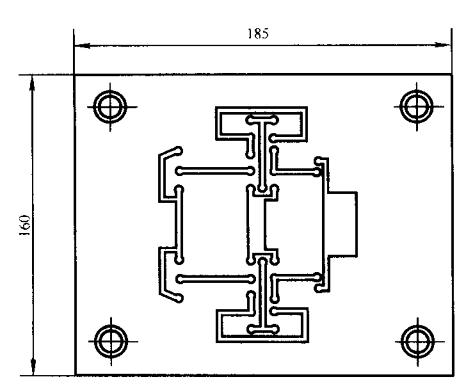


图 3.5-77　弹性工作台

编写：朱星（北京阿奇夏米尔工业电子有限公司）
　　　李明辉（上海交通大学）



第6章 现代制造技术在电火花线切割中的应用

1 现代制造技术

1.1 概述

（1）现代制造技术的发展背景

长期以来，人们都是采用常规的设计制造方法来开发产品，即以实践经验为基础，应用力学、物理学和数学领域的知识所形成的经验公式、图表和草图等作为设计基础来进行产品设计，并用传统的加工方法进行制造。随着现代科学技术的发展，人们对产品性能、可靠性以及生产效益等方面的要求越来越高，现在仍采用传统的设计制造方法显然难以满足产品发展的需要，必须借助于科学技术的发展，利用现代制造技术来开发新产品。

进入21世纪以来，整个世界正经历着前所未有的变化：

1）社会需求的多样化和个性化，人们对产品的要求不仅在于物质功能，而且附加了非物质（如文化、艺术、行销方式及售后服务等）的要求；

2）人们对劳动环境、劳动内容和自身主导地位的要求不断提高，人们希望逐步摆脱在生产过程中的被动地位，摆脱大量低级或重复的劳动，在发挥主动创造性工作中享受乐趣；

3）现代科技的迅猛发展，特别是微电子技术、计算机技术、信息技术、激光技术、新材料、新工艺以及集成技术的发展，使产品的设计制造过程及产品结构发生了根本的变化，机电一体化、智能化产品、模块式结构已成为工程产品的发展趋势；

4）先进工艺技术和制造系统的开发应用，为现代工程产品开发提供了前所未有的工艺技术手段和制造体制。

上述变化将深刻地影响着工程产品的发展，其核心问题仍旧是产品质量、开发成本和时间以及市场的相容性。将来的产品不仅要满足用户功能要求，而且还应以自身的特点来满足用户非物质功能方面的要求，例如安全性、环保性、用户培训、售后服务以及质量保证等。

伴随着计算机、信息技术、网络技术的进步和航空航天技术、材料科学技术等高新技术的发展，作为先进制造技术的一个重要分支的电火花线切割技术也像其他工程产品发展趋势一样，正在向信息化、智能化、绿色化和集成化等更深层次、更高水平的方向发展。

信息化的基础是数字化，它不仅体现在计算机辅助制图、自动编程和数控加工等方面，而且还包括各种数值模拟和加工过程仿真、多媒体虚拟现实、全面质量管理、成本评估以及虚拟制造和虚拟公司等。信息化将使产品开发和生产周期大幅度缩短，产品成本明显降低，而产品质量显著提高。与此同时，各类软件平台和数据库日臻完善，将为以人为核心的计算机辅助智能加工系统的开发创造条件。

智能化是柔性自动化的新发展和延伸。人类不仅要摆脱繁重的体力劳动，而且要从繁琐的计算、分析等脑力劳动中解放出来，以便有更多的精力从事高层次的创造性劳动，智能化促进柔性化，它使生产系统具有更完善的判断与适应能力。由于电火花线切割加工的精度和质量都要求很高，而它的加工过程又十分复杂，是一个多目标和多约束条件的复杂系统，建模和求解均十分困难。其出路将是利用基于知识的人工智能建模：通过计算机模拟人类专家的智能活动，进行分析、推理、判断和决策，以取代和延伸设计制造过程中人的部分脑力劳动，减少对技术人员的要求；引入新的数学方法和理论，如模糊推理、有限元分析、非线性理论、神经网络、小波分析、自学习和自适应理论；对专家的知识进行收集、整理、存储、共享与发展，建立我们所需的专家系统，实现设计制造过程决策自动化。

包括电火花加工行业在内的我国整个机床行业都面临着加入世界贸易组织之后世界机床市场严峻考验的形势，选择开放式体系结构、高效节能脉冲电源、智能控制等方向作为突破口，并坚决贯彻“绿色电火花加工”的概念，提高国产电火花加工机床的高技术附加值，提高国产电火花加工机床的市场竞争力，已成为刻不容缓的任务。绿色制造要求产品开发从开发到生产、运输、使用及维修、回收等整个生命周期都符合环保要求，实现全过程清洁加工，保证产品持续发展。

集成化要求设计制造过程不仅要面向需求，同时要面向制造和经营管理，使企业的各个生产环节成为一个不可分割的整体，统一考虑。设计制造过程不仅要对产品结构和功能进行优化，而且要对制造工艺、营销服务实施优化，综合应用现代管理技术、制造技术、信息技术、自动化技术、系统技术，将企业生产全部过程中有关人、技术、经营管理以及信息流与物质流有机地集成并优化运行，以实现产品高质、低耗、上市快、服务好，从而达到提高企业竞争力的目标。

（2）现代制造技术的内涵

现代制造技术的概念虽早已提出，各国学者也对它进行了大量的研究，但至今还没有一个严格的定义，然而，却是国际上早已形成的概念和被公认的一个技术术语。

现代制造技术是利用现代设计理论和先进制造技术来组织产品开发生产和管理。它是在传统制造技术基础上，不断吸收计算机、信息、自动化、材料及现代管理技术等方面的最新成果，并将其综合应用于产品开发与设计、制造、检测、控制、管理、销售、使用、服务乃至回收的制造全过程，实现优质、高效、低耗、清洁、敏捷生产，并取得具有市场竞争能力的社会、经济、技术等综合效果的制造技术的总称。其本质是信息、制造工艺、物流技术和现代管理技术的集合。由此可知，现代制造技术不同于传统的制造技术，而是不断发展并具有时代特征的制造技术。它有下述六方面特征。

1）综合性　现代制造技术不是某种加工技术，而是一项综合的系统技术，是制造技术与基础科学、经济管理、人文社会科学和工程技术先进成果、理论、方法有机结合产生的适应未来制造的先进技术，是多学科的交叉集成。

2）先进性　现代制造技术不是一成不变的，而是一个建立在不断吸取其他相关领域高新技术成果基础上的动态的、发展的技术，富有时代特征。它不摒弃传统技术，而是不断地应用科学技术的新成果、新手段去研究、充实和发展。

3）创新性　创新贯穿于产品生命周期的全过程，包括产品创新、生产过程工艺创新、生产手段创新、管理创新以及市场开发创新等。

4）系统性　现代制造技术讲究综合性、全过程、全生命周期的综合优化，它涉及产品从市场调研、产品设计、工艺设计、加工制造、销售、使用、服务乃至产品回收等产品全生命周期的所有内容，并将它们结合成一个有机的整体。

5）敏捷性　现代制造技术受顾客和市场的驱动，以人

为本，以信息为支柱，以效益（包括经济效益、社会效益和生态环境效益）为目的，强调人与技术、管理的有机结合，从而快速响应动态多变的国际市场，赢得激烈的国际市场竞争。

6）可持续性 现代制造技术追求绿色制造，讲究资源与环境保护，既要求其产品是所谓的“绿色商品”，即对资源的消耗少，对环境的污染最小，对人体的危害最小甚至为零，报废后便于回收利用，发生事故的可能性及所占空间最小等；又要求产品的生产过程是环保型的、可持续发展的。

从上述现代制造技术特征可以看出，它是一种较为理想的先进制造技术，涉及的内容很多，包括现代设计理论与方法、先进制造工艺与设备、自动控制及检测技术、信息技术和智能技术以及现代管理技术等。目前在电火花线切割加工技术中不可能完全体现，但为了自身的发展，仍有必要逐步采用现代制造技术，不断充实和完善电火花线切割加工技术。

1.2 WEDM 中的现代制造技术研究内容

（1）计算机辅助设计与制造

计算机辅助设计与制造，简称 CAD/CAM，是现代制造技术中最重要的基础之一。其含义是把计算机与工厂生产系统联系起来，实现用计算机系统辅助进行产品开发、计划、管理、控制及加工过程。计算机辅助设计与制造系统在电火花线切割加工中的应用，目前大致可以分为两类：一类是电火花线切割机产品开发和制造；另一类是电火花线切割加工的生产过程。

WEDM 中的 CAD/CAM，主要应用在以下几个方面。

1）计算机辅助设计（CAD） 当我们谈到计算机辅助设计（Computer Aided Design，CAD）时，人们往往会想到计算机辅助绘图。实际上，设计绘图仅是 CAD 的一个内容。CAD 主要的内容还在于利用计算机辅助完成产品设计的整个过程，包括根据人类需要建立产品需求，然后将产品的需求转变为一组功能需求和性能规范，并运用各种创造性方法、科学原理和技术知识，在一定约束条件下将这种功能需求和性能规范映射为一组设计解（产品），使之能被经济地生产出来。整个设计过程可分为下述四个阶段。

① 阐明任务 主要是搜集需求信息，明确设计任务。

② 概念设计 即根据需求信息，建立产品的功能结构，寻求合适的求解原理及其组合，确定基本的求解途径，得出求解方案。

③ 结构设计 根据概念决定产品的总体结构，并在技术和经济可行的前提下形成产品或系统方案，有时也称技术设计。

④ 详细设计 在结构设计的基础上，详细定义每一个零件的装配、形状、尺寸与公差、表面特征等，确定产品材料和规格，并校核技术和经济可行性，最后提交有设计工程图及其技术文件。

电火花线切割机产品的开发设计过程也要经过上述四个阶段，由于它又是机电一体化产品，整个设计过程较为复杂，特别是概念设计阶段，设计求解工作量较大（如图 3.6-1 所示），所以需用计算机来辅助。实际上，设计四个阶段和设计求解过程已反映了 CAD 的主要内容。而 WEDM 目前研究的 CAD 仅限于加工零件的图形生成和电极丝轨迹生成，尚未涉及产品的开发。

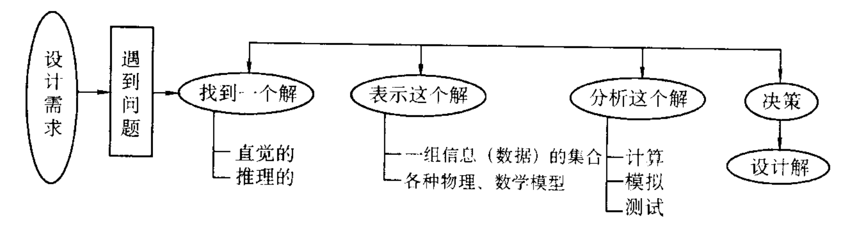


图 3.6-1 设计求解过程

2）计算机辅助制造（CAM） 计算机辅助制造（Computer Aided Manufacturing，CAM）是指利用计算机辅助整个生产过程，包括数控加工、自动编程、工艺准备、工艺过程设计、生产作业计划、质量监控、生产过程控制、物流管理等，但在电火花线切割加工中，目前 CAM 仅限于 NC 代码自动生成和刀具轨迹仿真，有关加工参数的自动选择甚至于都没有纳入。

数控电火花线切割加工的典型工艺过程如图 3.6-2 所示。其数控系统目前多采用 PC 控制，相比 NC 来说，可以通过修改软件扩大机床控制功能，允许在控制台上编辑和修改程序，还可以存储加工用的子程序和零件加工程序。此外，加工中的系统误差也可以自动进行补偿修正。

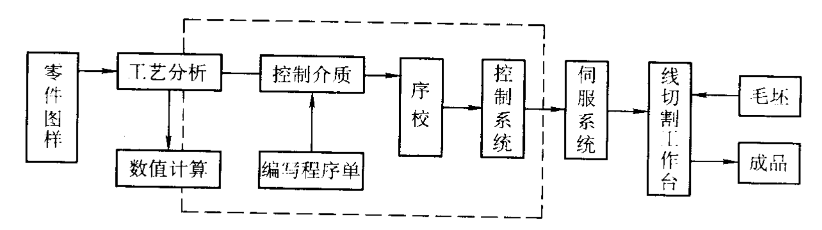


图 3.6-2 零件加工的典型工艺过程

数控加工程序编辑工作量很大，一般采用计算机进行自动编程。自动编程方法主要有数控语言编程（APT）、图像数控编程、语音编程和实物模型编程等多种方法。目前，可供用户选用的自动编程软件很多，不仅可以通过作图来生成加工指令，而且还可以根据零件图样或实物通过图形描述来生成加工指令。

3）计算机辅助工艺过程设计（CAPP） 计算机辅助工艺过程设计（Computer Aided Process Planning，CAPP）是指利用计算机辅助完成工艺过程设计，包括加工方法、加工设备及加工参数的选择；工序编排和工艺安排的决策；同时还涉及工艺尺寸核算、工时定额计算以及 NC 编程等等，是指导生产、确保产品质量的重要文件，是 CAD 和 CAM 的桥梁，

也是 CAD/CAM 系统进一步发展的核心。

工艺工程设计目标是制定一个零件的制造过程。工艺过程设计最原始的信息是产品零件的结构形状和技术要求，传统的方法是设计者通过工程图样把意图传送给制造者，而 CAPP 则必须解决零件的信息描述问题，以便将零件信息输入给计算机。

零件信息描述主要有零件分类编码法、表面元素法及零件造型输入法。零件分类编码法应用较多，其实质是用数字描述零件的几何形状、尺寸大小和工艺特征。这种方法是建立在成组技术（Group Technology，GT）基础上的一种方法。利用成组技术编码来描述一个零件，可以在宏观上描述零件而不涉及这个零件的细节。零件表面元素描述法的出发点是：任何一个零件都是由一个或若干个表面元素所组成，这些表面元素可以是圆柱面、圆锥面、螺旋面、斜面等，只要将组成零件的各表面元素逐个地按一定顺序输入到计算机，即可在计算机内构成零件原型。基本表面元素也可根据它的类型编成代码。对于 CAPP 来说，最理想的方式还是零件描述直接来自 CAD 数据库，将 CAD/CAM/CAPP 集成为一个统一的系统。

目前，国内外开发的 CAPP 系统很多，但本质上可以分为检索式（派生式）和创成式两大类。检索式 CAPP 系统是基于零件族的划分，它不能为不属于现有零件族的新零件设计工艺规程；对同一零件，从不同零件族检索出的工艺规程也可能不一致，但开发、使用方便，通常靠编好的程序以自动或人机交互方式进行。图 3.6-3 是典型的检索式 CAPP 系统图。

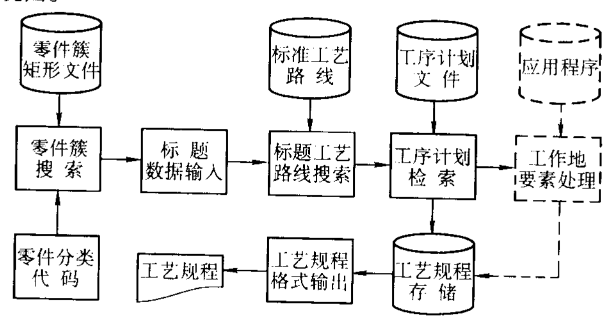


图 3.6-3　CAM-Ⅰ的 CAPP 系统

创成式是把技术人员工艺过程设计时的推理逻辑和决策方法转变成计算机可处理的决策模型和算法程序代码，并自动创成一个新零件的工艺规程。这种 CAPP 系统比较先进，但开发比较困难，仅在少数范围较窄以及功能较小的系统开发中得到应用。图 3.6-4 是智能 CAPP 系统结构图。

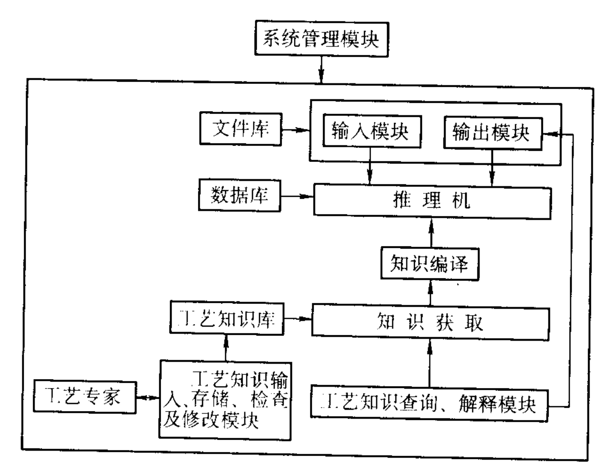


图 3.6-4　智能 CAPP 系统结构

4）计算机辅助生产管理　生产管理是对企业日常生产活动的计划、组织和控制，是和产品制造密切相关的各项管理工作的总称。传统的生产管理方法，常花费大量的人力和物力，其效率低，透明性和正确性都不高，严重阻碍了生产发展。

长期以来，人们仅仅把“制造”看作是由原材料经加工、装配成产品的过程，所以仅把工艺规划、库存控制、生产及维护等活动纳入“制造”的范畴，这是一种狭义的说解。实际上，“制造”不仅仅是物料的转换流通过程，而是有更广泛的内容。现代制造技术就是在计算机集成制造（Computer Integrated Manufacturing，CIM）概念指导下，充分利用自动化、信息和制造等方面的技术基础，通过计算机及其软件，将制造厂的全部生产活动所需要的各种分散的自动化系统有机集合在一起。这样，现代制造技术就应该包括计算机辅助生产管理，如图 3.6-5 所示。

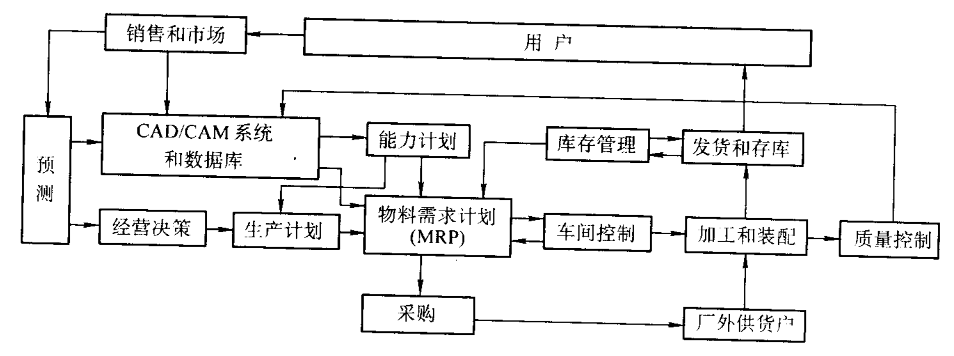


图 3.6-5　计算机化的生产管理系统

图中的许多功能模块是与传统的管理系统名称相同，但都是计算机化的子系统。在这个管理系统中，物料需求计划（MRP）是现代生产管理系统中的重要模块，是将生产计划转换成生产产品的原材料、标准体、外购件和所需要零件的细供应计划清单的计算机软件。这个清单应标明每种零件或材料的订货和供货时间，以配合工厂生产计划和车间作业计划的执行，保证计划产品按时完成。

图 3.6-6 所示的 MRP-II 系统是国际上比较流行的计算机辅助企业管理系统，它把一个企业经营的各个方面都连接在一起，包括销售、生产、工程设计、库存和流通等。除此之外，有的企业还在此系统基础上，开发了成本分析、成本管理、生产监控等子程序系统以及财务分析预测与决策等模块。

（2）敏捷制造与虚拟公司

1）敏捷制造的基本概念　美国为了制订 21 世纪制造业发展目标，曾组织百余家公司进行了大规模的调查研究，并

于 1991 年作了具有划时代意义的《21 世纪制造企业战略》的报告，提出了敏捷制造（Agile Manufacturing，AM）和虚拟企业（Virtual Enterprise，VE）的新概念，描绘了已经开始的全球制造（Global Manufacturing，GM）的未来全景。报告认为，随着人们生活水平的不断提高，人们对产品的需求和评价标准将从质量、功能和价格转为最短交货周期、最大客户满意度、环境保护和个性化等方面。而且制造业正面临许多世界性问题的困扰，如自然资源日渐匮乏、生产环境遭到破坏、区域贸易不平衡、用户需求不断变化以及市场竞争日趋激烈等。由此，每个企业都需要一定敏捷能力去适应用户需求和环境变化，以取得最大限度的经济效益和社会效益。

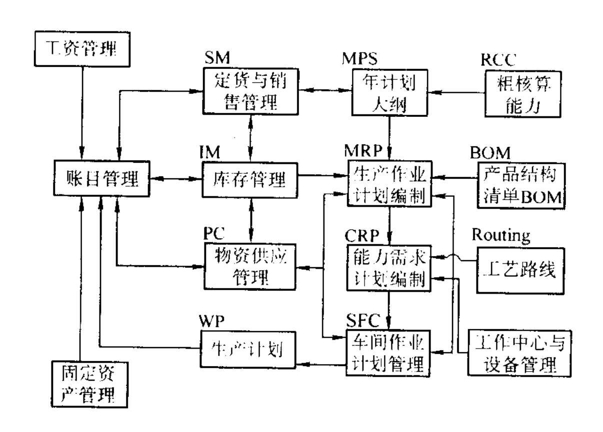


图 3.6-6　MRP-Ⅱ 系统典型功能组成图

按照敏捷制造的定义，敏捷是一种能力，它能从迅速发生的变化、大批量的市场不断细化、个性化的全球市场以及基于顾客价值的产品的服务中获得利润。敏捷是一种新型的经营竞争型系统。企业可通过根本性的组织再设计和新的市场战略、综合制造、信息和通信技术中的新技术来达到敏捷制造。而且不仅仅限于一个企业，还可以通过虚拟企业来实现敏捷制造。所谓的虚拟企业，又称动态联盟，是指在面向市场需求某一产品而单个企业无足够资源独立赢得竞争时，由若干企业暂时联合起来，一起抓住机会，发挥各自优势进行合作生产，共同获得利润，一旦任务完成则自动解散。这种经营体制也称接插式制造系统，是当前国际上企业改组的基本趋势。其核心是要求每个企业全力做好自己擅长的那部分工作，而把其余的部分让给更擅长的其他企业去做，通过利益共享来实现风险共担。电火花线切割加工机发展变化很快，市场竞争也十分激烈，而生产企业的资源又有限，采用这种敏捷制造方式容易在市场竞争中获得成功。

2）敏捷制造的特点　敏捷制造强调将柔性的、先进的、实用的制造技术，熟练掌握生产技能的、高素质的劳动者以及企业之间和企业内部灵活的管理三者有机地集成起来，实现总体优化，对千变万化的市场作出快速响应。AM 具有以下特点。

① 重视发挥人的作用　在敏捷制造企业中，十分重视发挥人的作用，将人作为企业一切活动的中心。还十分注重用户的参与。

② 产品和生产过程的环境保护　环境问题将是 21 世纪最重要的问题之一。敏捷制造高度重视环境问题，不仅强调生产过程的环境保护，而且提供的产品也应是环保型的。

③ 柔性的、可重构的和不断改变的生产系统　柔性重构（Re-engineering）是敏捷制造企业的重要特征之一。为了快速响应市场，敏捷地完成某一生产任务，必须可以随时将企业中的人员及设备进行柔性重构。为了实现重构，除产品具有模块化结构外，人员也应该具备所需的技能与适应能力，设备应具有足够的柔性。提高柔性的手段之一就是采用可重新配置的、模块化的生产设备。

④ 并行的组织管理机构　敏捷制造要求企业的组织机构也应是敏捷的，“牵一发而动全身”，各个部分都能够迅速响应来自决策层的命令或来自其他工作小组地协作要求，严格按 ISO 标准行事。因此，并行的工作方式是敏捷制造的重要工作方式。

⑤ 先进的技术系统　敏捷制造企业应具有领先的技术手段和掌握这些技术的人员。除了大容量的高速计算机系统外，还应有完整的、覆盖全企业的数据库和高通过量（频宽）的计算机网络。加上设计分析/仿真软件和多媒体技术的发展，可以实现产品设计时的性能仿真和虚拟制造以及快速样件生成。这些手段可以保证产品设计的一次成功率，缩短产品开发周期，实现对市场的快速响应。敏捷制造企业还有一套行之有效的质量保证体系，使设计制造出来的产品达到社会和用户都满意的程度。

⑥ 基于信息高速公路的虚拟企业　敏捷制造采用标准化和专业化的计算机网络和信息集成基础结构，以分布式结构连接各类企业，构成虚拟制造环境。以竞争合作为原则，在虚拟制造环境内动态选择成员，组成面向任务的虚拟企业进行快速生产。

3）敏捷制造的基础结构　虚拟企业生成和运行所必需的条件决定了敏捷制造基础结构的构成。一个虚拟企业存在的必要条件包括物理基础、法律保障、社会环境和信息技术四个方面，它们构成了敏捷制造的基础结构。

① 物理基础结构　指虚拟企业运行所必需的厂房、设备、设施、运输、资源等物理条件，它涉及一个国家乃至全球范围的物理设施。当一个机会出现时，为了抓住机会，尽快占领市场，只需要添加少量必需的设备，集中优势开发关键部分，而多数的物理设施可以通过选择合作伙伴得到。因此，对希望参与敏捷制造的企业来说，除具有专业化生产特点外，还要实现网络化，以便在虚拟企业运行中，通过网络接收或传送加工产品的技术信息和数据程序，以及参与虚拟企业的管理等。

② 法律基础结构　也称为规则基础结构。指虚拟企业运行所必须遵循的规则，主要指国家有关虚拟企业的法律、合同和政策等。具体来说，它规定如何组成一个法律上承认的虚拟企业，如何交易，利益如何分享，资本如何流动和获得，如何纳税，虚拟企业破产后如何还债，虚拟企业解散后，如何保证产品质量的全程服务，人员如何流动等。由于虚拟企业是一种新的概念，它给法律界带来了许多新的研究课题。

③ 社会基础结构　虚拟企业要能生存和发展，还需要相应的社会环境，即由社会提供为虚拟企业服务的公共设施等。例如虚拟企业经常会解散和重组，人员的流动是一个非常自然的事。人员需要不断地接受职业培训，不断地更换工作环境，这些都需要社会来提供职业培训、职业介绍的服务环境。

④ 信息基础结构　这是指敏捷制造的信息支持环境，包括能提供各种服务的网点、中介机构等一切为虚拟企业服务的信息手段。

4）敏捷制造的实施　敏捷制造的实施包括敏捷制造战略选择、敏捷化建设、敏捷制造系统建立和敏捷制造系统运行与管理等步骤，是一个不断完善与发展的过程。图 3.6-7 表示实施敏捷制造的一个框架性方案，主要包括市场分析与评估、敏捷化设计、敏捷化制造、敏捷化后勤与合作和敏捷化销售与服务等功能。

企业首先进行市场分析与评估，在需求预测和定单的基础上，采用质量功能配置、价值工程等技术，按照需求、重

要性、成本和技术难度等评价指标进行评估，将需求转化为相应的工程目标，然后对工程目标进行敏捷化设计。在进行敏捷设计时，一般将产品开发过程分为全新产品设计和组合产品与变形产品设计两部分，并相应采用由企业自己完成设计任务或通过企业间的合作完成设计任务。企业间合作以竞标方式寻找合作伙伴，采用群组协同工作方式，通过网络基于同一产品模型合作完成设计、主要完成那些对本企业是与用户需求有关的特殊零部件，而对合作伙伴是典型零部件或变形零部件的设计。通过向下游的设计预发布，采用成熟的设计与工艺，并结合物料情况，形成详细设计方案，然后对设计方案进行技术经济性评估，分析确定需要外购或外协加工的零部件，制定生产计划，并对生产系统与后勤保障作相应调整，动态调配生产资源，组织制造活动，从而建立逻辑上的或实际的临时性功能组织（虚拟企业），协调相应的组织关系和业务关系等，并采用基于网络的PDM技术对整个业务、生产过程、产品信息等进行集成管理，实现敏捷制造。

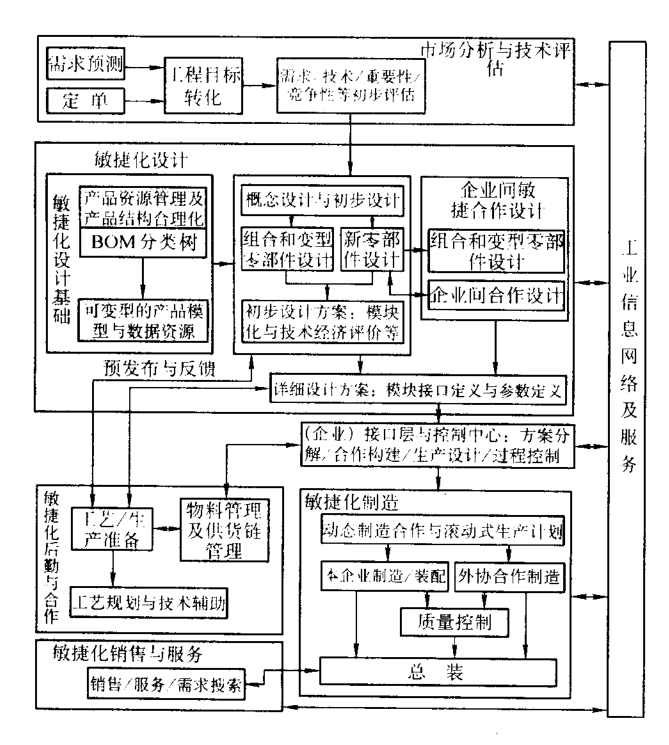


图3.6-7 敏捷制造实施框架

可以看出，敏捷制造的基本特征就是企业在信息集成与过程集成基础上的合作与竞争。

因此，开放式计算机网络与集成框架、敏捷供应链与资源优化和并行工程等都是实施敏捷制造的关键技术。

（3）虚拟制造

1）虚拟制造的概念　随着各种现代制造技术与系统的产生、研究与实践的不断深入，以及计算机仿真技术、CAX技术和虚拟现实技术的发展，美国于20世纪90年代初提出了虚拟制造的概念。

虚拟制造（Virtual Manufacturing，VM），又称拟实制造，它不是事实上的但又是本质上的在计算机上实现将原材料加工成产品的过程。也就是借助仿真技术和虚拟现实技术等，将实际制造系统映射为计算机中的虚拟制造系统，通过对产品设计、制造等生产过程和生产资源进行统一建模，从而在虚拟环境中真实地模拟产品设计、工艺规划、加工制造、功能分析、质量检验以及各生产过程的管理与控制等产品制造全过程，以便在产品设计阶段或实际生产前，就能准确地预测产品的性能、生产过程和制造成本等，达到优化产品设计与生产过程和提高投资效益与降低新产品开发风险的目的。

虚拟现实（Virtual Reality）是指利用高性能计算机和其他专用硬件和软件在计算机上建立的一种精确反映真实世界的物理属性和动态形为的合成（虚拟）环境，并通过多种传感设备使用户“进入”到该环境中，实现用户与该环境进行实时、自然交互的技术。其关键技术为建模、仿真和人机接口技术。

虚拟制造从根本上改变了设计、试制、修改设计和规模生产的传统制造模式，在产品真正制造出来之前，首先在虚拟环境中生成虚拟产品原型、进行性能分析和可制造性评估，从而使制造技术走出主要依赖于经验的狭小天地，发展到了全方位预报的新阶段。

2）虚拟制造的特点　虚拟制造是在计算机及网络系统中实现制造，它使用的是产品和过程模型，以及制造设备模型，生产出的是数字化产品。其主要特点如下。

① 虚拟制造通过对实际制造系统进行建模，将实际制造系统映射成虚拟系统来实现制造过程，因此建模技术是虚拟制造的核心和关键技术。正是由于虚拟制造系统是基于模型的虚拟系统，所以系统中不存在物质流，不需要真实的物理设备，不消耗原材料，不产生真正的产品，因此不会造成材料和物理资源的浪费。

② 在企业进行新产品开发、产品改型，生产过程和生产组织进行大规模调整，以及实施有关新技术时，通过事先在虚拟制造系统上进行仿真和模拟，可对其可行性及效益、风险进行有效的预测和评估，避免财力、物力的浪费，降低决策的失误率。

③ 通过对产品设计、制造各个阶段的仿真模拟，在实际制造之前展示各个阶段的“实况”，便于及早发现问题，优化产品设计、制造过程及各个阶段的关系，提高企业各级决策与控制能力，达到全局优化，进而缩短产品开发与制造周期，提高产品质量，降低生产成本，提高企业服务水平。

④ 通过对产品、制造资源以及企业的各种活动进行建模，构建虚拟制造系统，可支持虚拟企业的构建和制造资源的配置和重组。可使分布在不同地点、不同部分的人员在统一的虚拟环境下，针对同一产品对象进行协同工作，实现异地制造和企业集成。

3）虚拟制造技术的体系结构　虚拟制造技术的体系结构由三大主体技术群（建模技术群、仿真技术群、控制技术群）和一个支撑技术群（为三大主体技术群的实施提供支持）组成。

① 建模技术群　建模技术群是指用来开发虚拟制造系统中各种模型的所有技术与方法。根据建模对象的不同，建模技术可以分为产品建模、过程建模、制造资源建模和虚拟企业建模等。

② 仿真技术群　仿真技术群是指运行和操作构成虚拟制造系统的各种模型的所有方法和技术。分布式交互仿真技术和虚拟现实技术是仿真技术的最新发展。

③ 控制技术群　控制技术群是指建模过程与仿真过程所用到的各种管理、组织与控制技术与方法。主要包括：

a）模型部件的组织、调度策略及交换技术；

b）仿真过程的工作流程与信息流程控制；

c）虚拟制造方法论；

d）概念设计与制造方法、加工过程、成本估计集成技术；

e）集成动态的、分布式的、协作模型的集成技术；

f）实现最佳设计的冲突求解技术；

g）基于仿真的推理技术；

h）模型及仿真结果的验证、确认技术等。



④ 支撑技术群 支撑技术群是指支持虚拟制造系统开发、控制与运行的基础性技术。主要包括：

a）数据库技术；

b）人工智能技术；

c）系统集成技术；

d）分布式智能协同求解技术；

e）综合可视化技术；

f）计算机软硬件技术以及通讯技术；

g）人机接口技术等。

4）虚拟制造系统的建立 虚拟制造系统是现实制造系统在虚拟环境下的映射，是基于模型和仿真的系统。它由虚拟产品设计、虚拟产品制造、虚拟并行运作、模型与数据管理和系统控制体系等重要部分组成，如图3.6-8所示。

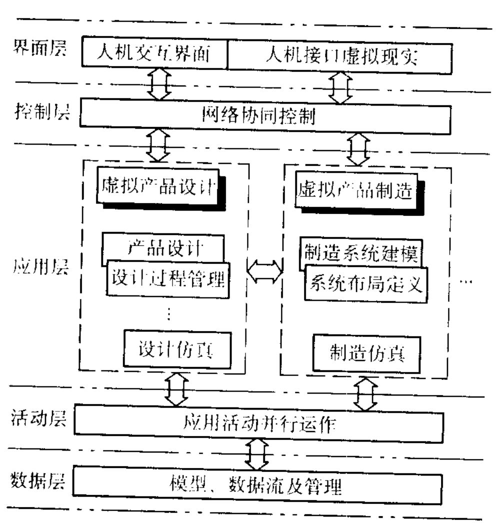


图3.6-8 虚拟制造系统体系结构

① 虚拟产品设计 借助CAX、DFX（Design for X，面向产品生命周期各/某环节的设计）以及快速原型技术等为设计者提供一个设计产品、评价产品的可制造性和可供应性的设计工具与环境，从而及时发现设计中可能存在问题，并对设计结果进行优化。

② 虚拟产品制造 提供了一个产生工艺规划和生产计划、规划资源需求（新设备的购买等），以及评价这些计划的方法和环境，从而实现在不实际生产产品的情况下，维持产品的可制造性，这能够为产品交货提供更精确的成本信息和时间表。

③ 控制体系 负责对仿真过程进行控制和管理，通过提供模拟实际生产能力为工程师提供了一个根据车间有关部门活动来评价新设计或改进产品设计的环境。它通过控制过程仿真为优化制造过程、改善制造系统提供了可能性。

虚拟制造系统是一个复杂大系统，它的实施是一个认识—改进和完善—提高的过程。应立足于制造企业现有条件，并不断吸收和采纳新的制造技术和工艺，从虚拟制造实施框架中选择适合于本企业的某一个或几个方面进行实施，并在企业的发展中不断改进，逐渐实现制造业的全面虚拟化。

目前，国外软件公司在巨大应用需求的推动下，推出了Deneb、Multigen、dVISE、WorldToolKit、Modit、Lightscape、EAI等一批支持虚拟制造的软件产品，可实现虚拟样机设计分析、虚拟环境漫游、加工过程仿真、虚拟装配和拆卸等功能。

（4）模糊控制与智能控制

传统的控制理论和大系统理论，其分析、综合和设计都是建立在严格而又精密的数学模型基础上的。而在科学技术和生产力水平高速发展的今天，人们对大规模、复杂和不准确系统实行自动控制的要求不断提高。因此，传统的基于精确数学模型的控制理论的局限性日益明显。在工程实际中，需控制的系统常常存在着不确定性、非线性、时变、时滞和分布式等特性，因此要建立精确的数学模型十分困难，甚至是不可能的，如电火花线切割加工过程控制，有众多的输入量，也有多个控制目标。目前无法用精确的数控模型来描绘其输入量与输出量的关系。因此，发展智能控制十分必要。

所谓智能控制，傅京孙于1971年提出了自动控制理论和人工智能相结合为主体的概念，后来Saridis将智能控制的内容确定为人工智能（AI）、运筹学（OR）和自动控制理论（AC）三门技术学科的交集。智能控制的概念是针对系统及其控制环境和任务的不确定性而提出来的，因此智能控制过程含有复杂性、不确定性、模糊性。在智能控制过程中，是以知识信息为基础进行推理和学习，用启发式方法来引导求解过程，从而得以在大范围内实现快速自组织的目标。一个较完善的智能控制系统，它的一个显著特点就是其内部具有适应或应变外界环境和任务不确定性的功能，具有学习和自组织能力的灵活的推理决策机制，即系统存在着智能单元，它能在学习基础上进行推理和决策。在目前的技术条件下，智能控制是控制科学发展的最前沿，它代表着控制科学发展的新阶段。基于规则的智能控制是智能控制的一个十分重要的方面，其中较成熟而行之有效的是模糊控制和专家控制系统。

所谓“模糊”，是指客观事物彼此间的差异在中间过渡时界限不分明，如天气热、很热；误差较大、很大等，这些量显然与通常的数学上的精确量不同。在实际工程中，工人或技术人员有时只是以这些模糊量来对一些对象进行操作或控制。现代的模糊控制是建立在模糊逻辑基础上的，其实则是将基于专家知识的控制策略转换为自动控制策略。它所依据的原理是模糊隐含概念和复合推理规则。经验证明在一些复杂系统，特别是系统存在不精确和不确定信息的情况下，模糊控制的效果常优于常规控制。由于现代计算机的高速计算、储存与逻辑判断等功能不断地发展，模糊控制从日常生活设施至工业等各个领域的应用不断发展，是一种很有前途的控制。

1）模糊关系 在通常的可控系统中，输入与输出间有确定的关系，这时可以用其传递函数来表示。在模糊控制中，模糊关系代表不同论域中模糊变量间的映射（转换），它通过条件及结论（或称语言推断）叙述来体现，即：

若 $A(x)$，则 $B(x)$；或写成 $A \Rightarrow B$

上述语句联系了条件集（前提）A（用 $\mu A(x)/x \in X$ 来代表）与结论集 B（用 $\mu B(y)/y \in Y$ 来代表），反映了模糊关系。以上条件与结论叙述所建立的模糊关系为一个二元模糊关系，它可被看作为模糊集 A 和模糊集 B 的直积 $A\times B$ 的一个模糊子集 R，即

$$A \times B = \int_{X\times Y} \mu_A(x) t \mu_B(y)(x,y) \qquad (3.6\text{-}1)$$

式中 $X\times Y$ 是序偶 (x, y) 的组合，即 $X\times Y = \{(x, y)/x\in X, y\in Y\}$。模糊关系中的直积可定义如下：

若 A_1，…，A_n 为在 x_1，…，x_n 中的模糊集，于是 A_1，…，A_n 的直积即为在积空间 $x_1\times x_2\times\cdots\times x_n$ 的一个模糊集，它具有以下的隶属函数：

min交 $\mu(A_1\times A_2\times\cdots\times A_n)(x_1,x_2,\cdots,x_n)=\min\{\mu A_1(x_1),\mu A_2(x_2),\cdots,\mu A_n(x_n)\}$

代数积 $\mu(A_1\times A_2\times\cdots\times A_n)(x_1,x_2,\cdots,x_n)=\mu A_1(x_1)\mu A_2(x_2)\cdots\mu A_n(x_n)$

所以说得严格一些，一个具有 $A \Rightarrow B$，R 形式的模糊关系可定义为从集 $A \subset X$ 到集 $B \subset Y$ 的一个直积 $X \times Y$ 的模糊子集。R 是一个双变量的隶属函数 $\mu R(x, y)$，可写成

$$R = \int_{X \times Y} \mu_{R}(x,y)/(x,y) = \int_{X \times Y} \mu_{A}(x) t \mu_{B}(y)/(x,y) \tag{3.6-2}$$

对有限集来说，上式 R 的隶属函数为

$$\mu_{R}(x,y) = \mu_{A \times B}(x,y) = \begin{cases} \min[\mu_{A}(x), \mu_{B}(y)] 交 \\ \mu_{A}(x) \times \mu_{B}(y) 代数积 \end{cases} \tag{3.6-3}$$

从物理意义上来说，隶属函数 $\mu R(x, y)$ 相当于在 (x, y) 间影射（转换）的连接强度，或称相互关系。通常式（3.6-3）的 R 具有矩阵形式，该式亦可写成

$$A \times B = \sum_{x,y} \mu_{A}(x) t \mu_{B}(y)/(x,y) \tag{3.6-4}$$

若论域为 n 个集合的直积，则

$$R = A_1 \times A_2 \times \cdots \times A_n$$

为了说明上述 R 的形成方法，我们设：

$$X = \{1, 2, 3\},\ Y = \{1, 2, 3, 4\}$$

$$\mu_{A}(x)/x = \frac{1}{1} + \frac{0.7}{2} + \frac{0.2}{3}$$

$$\mu_{B}(y)/y = \frac{0.8}{1} + \frac{0.6}{2} + \frac{0.4}{3} + \frac{0.2}{4}$$

于是式（3.6-2）及式（3.6-3）中 $A \times B$ 的代数积为

$A \times B = 0.8/(1, 1) + 0.6/(1, 2) + 0.4/(1, 3) + 0.2/(1, 4) + 0.56/(2, 1) + 0.42/(2, 2) + 0, 28/(2, 3) + 0.14/(2, 4) + 0.16/(3, 1) + 0.12/(3, 2) + 0.8/(3, 3) + 0.04/(3, 4)$

它的矩阵形式为

$$\boldsymbol{R} = \begin{bmatrix} 0.8 & 0.6 & 0.4 & 0.2 \\ 0.56 & 0.42 & 0.28 & 0.14 \\ 0.16 & 0.12 & 0.8 & 0.04 \end{bmatrix}$$

我们将 $\boldsymbol{R}$ 称为模糊关系矩阵（模糊矩阵），将 $\boldsymbol{R}$ 与普通关系矩阵相比较，可知普通关系表示二元素之间有无关连，而模糊关系则表示二元素之间关连的程度。另外，从数学角度来看，普通关系值域是 0 与 1，而模糊关系的值域是闭区间 [0, 1]。

根据模糊关系矩阵，经运算后可得其模糊关系，并能进行模糊推理。模糊推理用得较多的是条件判断语句，如“若 $A(x)$ 则 $B(y)$”，“若 A 是快速，则 B 是慢速”等。

2）模糊控制原理　图 3.6-9 是一个模糊控制系统的示意图。这种控制系统的输入和输出都是精确值，而控制算法是模糊算法。因此，该系统包含两个量的转换过程。

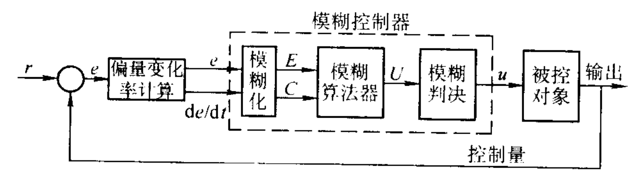


图 3.6-9　模糊控制系统示意图

在图 3.6-9 所示系统中，系统输入 r 与输出相比较，得到偏差 e。经过偏差变化率计算，得到 de/dt。偏差 e 和偏差变化率 de/dt 作为两个输入信号，经模糊化，进入模糊控制器。在进入模糊控制器以前的信号，均是精确量。经过模糊化，将精确量变成模糊集 E 和 C，E 对应偏差量，C 是偏差变化率 de/dt 的模糊集。模糊算法器是模糊控制器的核心，它将人的操作经验、思维过程，总结成模糊关系和模糊推理法则，计算出相应的控制 U，U 是一个模糊集，再经过模糊判决，得到精确的控制量 U，去控制被控对象，这就是图 3.6-9 所示的模糊控制系统的工作原理。

在电火花线切割加工中，国内外都利用模糊控制技术对 WEDM 的智能加工、进给控制以及加工参数的优化选择等方面进行了大量的开发研究工作，取得了很好的效果。

2　电火花线切割的计算机仿真

2.1　电火花线切割加工计算机仿真技术概述

（1）仿真基本概念

“仿真”（Simulation）是通过对系统模型的实验来研究一个存在的或正在设计中的系统。系统仿真是根据被研究的真实系统的模型，利用计算机进行实验研究的一种方法，系统仿真分类如表 3.6-1 所示。它是建立在系统科学、系统识别、控制理论、计算技术与控制工程基础上的一门综合性很强的实验科学技术，是分析、综合各类系统，特别是大系统或复杂系统的一种研究方法和有力的工具。仿真的一般过程如图 3.6-10 所示。

表 3.6-1　系统仿真分类

仿真类型	模型类型	计算机类型	经济性
物理仿真（模拟仿真）	物理模型	模拟计算机	费用很高
半物理仿真（混合仿真）	物理－数学模型	混合计算机	费用中等
计算机仿真（数字仿真）	数学模型	数字计算机	费用不高

随着计算机技术的发展，计算机求解复杂系统的数学模型的功能也越来越强，采用计算机对系统进行数学仿真（也称数值模拟）已日益为人们所重视，并得到广泛应用，数学仿真试验所需的时间比物理仿真大大缩短，试验数据的处理也要简单很多。

由于数学仿真的主要工具是计算机，因此常称“计算机仿真”。从本质上讲，仿真技术就是建立仿真模型和对模型实验的一种技术。计算机仿真过程的实现一般都可由计算机高级语言、仿真语言和仿真软件来完成（如图 3.6-11 所示）。

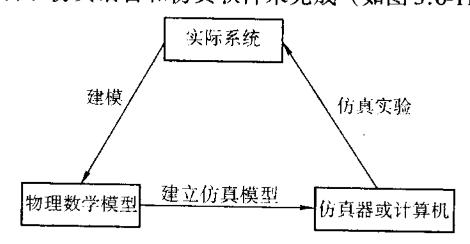


图 3.6-10　仿真过程示意图

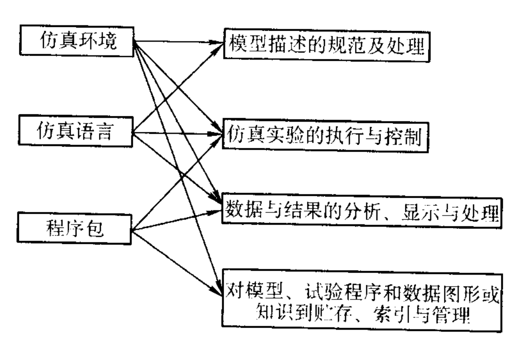


图 3.6-11　典型仿真软件的功能覆盖



几乎每一种制造技术的进步都带来了相应的模型和仿真应用的发展。在从产品的设计到制造以至测试维护的整个生命周期中，计算机仿真技术贯穿始终（如表3.6-2所示）。

仿真的目的在于缩短周期，降低成本。制造过程是仿真应用的传统方面，制造过程的仿真必须把产品模型和制造系统模型结合起来加以考虑，但它不仅仅是两者的简单相加，还需考虑控制策略、库存能力、负载能力等方面的问题。这三个方面的仿真是相互联系、相互影响的，有时在内容上还会有重叠。

表3.6-2 计算机仿真在整个产品生命周期中的应用

阶段	计算机仿真的应用
概念设计	产品动力学分析（如应力分析、强度分析） 产品运动学仿真（如机构之间的连接与碰撞）
详细设计	刀位轨迹仿真 加工过程度仿真（检查NC代码） 装配仿真
加工制造	制造车间设计（布局、设备选择） 生产计划于作业调度制定 各级控制器设计 故障处理
测试	测试用仿真器
培训/维护	训练用仿真器
销售	供应链仿真器

（2）计算机仿真的基本步骤

计算机仿真的过程就是建立系统模型并通过模型在计算机上的运行来对模型进行检验和修正，使模型不断趋于完善的过程。所以仿真研究如同计算机应用软件开发一样，都分为若干阶段。图3.6-12描述了系统仿真研究的基本步骤。

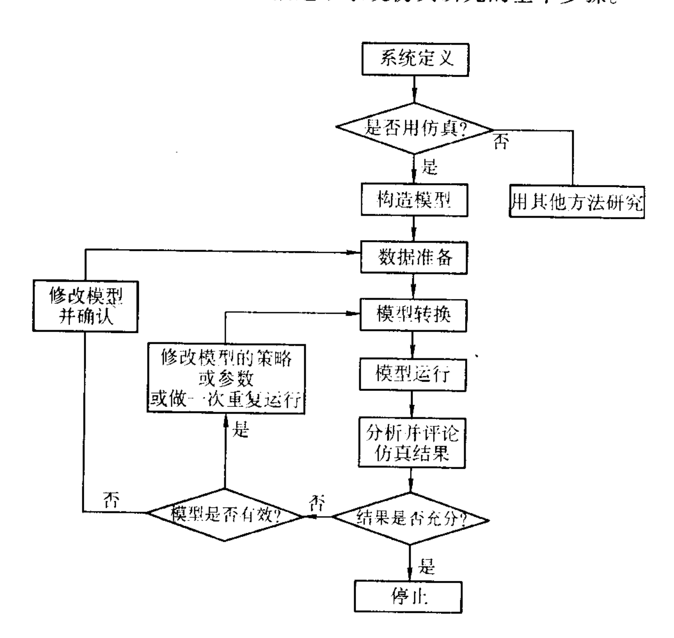


图3.6-12 系统仿真过程

1）系统定义　在试图求解问题以前，要详细地定义系统。定义一个系统时首先必须提出明确的准则来描述系统目标及是否达到目标的衡量标准，其次必须描述系统的约束条件。然后要确定研究的范围，即确定哪些实体属于要研究的系统，哪些属于系统的环境。

2）构造模型　构造模型时要把真实系统缩小抽象，使它规范化，必须确定模型的要素、变量和参数以及它们之间的关系，在一定的约束条件下用数学模型描述所研究的系统。模型必须和研究目的紧密联系，要有明确的目标与要求，模型的性质要求和真实系统尽量接近。同时模型必须尽可能简单明了，容易控制和操作，易于为用户所理解，并应便于修正和改进。但要避免把模型过于简化，不然得到的是一个平庸的模型；也不能过分具体，以致降低模型的效率和难以处理。

3）数据准备　数据准备包括收集数据和决定在模型中如何使用这些数据。收集数据是系统研究的一个组成部分，必须收集所研究系统的输入、输出各项数据以及描述系统各部分之间关系的数据。收集仿真数据要花费很多时间和费用，因此，必须有效地进行观测，按照收集到的数据确定模型中随机变量的概率分布或概率密度函数以及各项参数。

4）模型的转换　模型的转换指用计算机高级语言或专用仿真语言来描述数学模型，以便用计算机运行模型来仿真被研究的系统。模型是用程序设计语言编成的程序，为此必须在高级语言和专用仿真语言之间作出选择。专用仿真语言的优点是易学、易用，具有面向进程的仿真程序结构，仿真功能强，有良好的诊断措施等。曾有人做过统计比较，在使用仿真语言GPSS时，程序设计和调试的时间是用FORTRAN语言所需时间的15%，相应地，用于编译和仿真的机器时间为FORTRAN语言的32%，这个结果是带有普遍性的。然而有经验的程序设计人员则认为仿真语言缺乏灵活性。

5）模型运行　运行模型的目的是为了得到有关被研究的系统的信息，了解和预测实际系统运行的情况，特别是在输入数据或决策规则有变化时输出响应的变动情况。因此，模型运行是一个动态过程，要进行反复的试验运行，从而得到所需要的试验数据。

6）分析并评论仿真结果　由于仿真技术中包括某些主观的方法，如抽象化、直观感觉和设想等，因此在将仿真报告提交管理部门之前，必须对仿真结果作全面的分析和论证。对仿真结果进行分析有两个基本目标。

① 确定仿真实验中获得的信息是否充分，并探索新的方案，例如，改变模型的结构或参数，确保仿真结果信息的可靠性。

② 把仿真数据精简、归纳并提供管理部门以辅助决策。

（3）电火花线切割加工仿真研究现状

近十年来，WEDM机理研究没有取得突破性的进展。其原因除放电过程本身的复杂性、随机性外，还由于研究手段没有创新。传统的高速摄影对于脉冲放电很难获得完全信息，其结果很难作定量分析。常用的检测装置可以测量放电间隙的某些参数，并可拟合出它们之间的经验关系。但仍有些加工状态参数很难直接测量，而这些参数对于控制加工状态却是十分重要的。因此有必要引入现代研究技术和方法，克服传统研究方法的局限性，深入研究揭示放电过程的微观情况和本质，建立反映放电加工客观规律的模型，为机床设计和加工过程提供可靠的数据。

利用计算机仿真技术进行电火花线切割加工工艺效果的计算机仿真研究，既能提供一个有效的研究手段，推动机理研究的进展，又可应用于实际加工过程中，实现线切割加工的自动化和智能化。因而它对线切割加工，尤其是国产高速走丝线切割加工的发展具有十分重要的现实意义和促进作用。人们已在WEDM的许多方面进行了仿真探索，主要可以归纳如下。

1）复杂曲面线切割仿真　哈尔滨工业大学对复杂曲面线切割仿真技术进行了研究。分析复杂空间曲面线切割加工

的规律，建立各种运动形式下的运动方程，在计算机上模拟实现电火花线切割机床加工复杂空间曲面的过程。

2）放电间隙电蚀产物的分布　电蚀产物的含量与分布会影响放电间隙的大小和一致性、直接关系到工件的尺寸精度和表面粗糙度。东京大学 Masuzawa 等人研究了喷射冲液时电介液的流动、电蚀产物的产生和扩散，在此基础上仿真研究了放电间隙电蚀产物的分布，为喷射冲液时喷头设置提供了依据。

3）电极丝的振动　瑞士的 Dauw、Delpretti 和 Tricarico 建立了线切割电极丝的振动和变形的数学模型，分析了电极丝在自由振动、在工作液中以及线切割加工中三种不同情况下的振动。这些公式还相当简单，无法在实际生产中加以应用。若这方面取得突破，可据此设计出能抑制电极丝振动的电源和张紧机构，降低高速走丝线切割的表面粗糙度，实现高速走丝精密切割。

4）热模型　Jennes、Snoeys 和 Dekeyser 建立热模型，并分别用解析法和有限差分法确定电极丝上的温度分布，分析了热载荷是引起断丝的主要因素。Banejee 以及 Rajurkar 等人也进行了这方面的研究。所有热传导计算结果与实际加工结果相差较大，只能是定性或粗定量地反映电极丝上的温度分布和蚀除速度。这是因为能量在电极丝上的分配没有确切的数据，放电通道半径尚未找到精确的计算公式。上海交通大学建立了热传导的有限差分模型，并针对不同峰值电流和脉冲宽度的脉冲电流进行了仿真试验，获得了与物理实验结果较为吻合的结果。

5）加工过程的识别　Konishi 采用人工神经网络来识别加工过程。他们采用分层前馈神经网络，根据脉冲峰值电流和脉冲频率来判别加工过程是否正常，但它们没有研究加工参数对加工过程的影响，因而只能识别加工状态，还不能有效控制加工过程。

6）线切割加工间隙状态预测系统的仿真　哈尔滨工业大学采用人工神经网络预测与各输入条件相对应的相对火花率（Fe）和相对短路率（Fs），对 WEDM 放电状态的间隙检测法进行了初步的探索。

7）电火花线切割加工工艺仿真研究　美国 Nebraska-Lincoln 大学 D.Scott 等人在 729 个试验数据基础上用因子设计方法建立工艺参数（放电电流、脉宽和脉冲频率）与工艺效果（切割速度和表面光洁度）之间的关系，并据非与优点的概念从中选出最佳的 32 组加工参数。这种方法要进行太量的工艺试验，而且不能根据特定的加工工艺要求优选出相应的加工参数。台湾的 Y.S.Liao 等人对线切割加工过程进行变量分析，用回归与相关分析方法建立加工工艺参数的数学模型。北京第四机床厂采用回归正交设计，通过全因素试验，分别建立了切割效率模型和表面粗糙度模型。以上三种方法在本质上类似，这些方法由于没有考虑 WEDM 加工过程的随机性和复杂性，特别是数控电火花线切割机床其电参数和控制参数都数字化的特点，用精确的数学模型去描述 WEDM 加工过程，必然使得求解出的结果不能满足实际加工要求。Alekseyer 和 Korenblum 深入分析线切割加工的机理，并结合统计力学的方法，提出一种放电脉冲参数及冲液量的计算方法。他们的研究对工艺过程的研究有一定的指导作用，但提出的计算方法与实际加工有很大差别，还不能作为实际生产加工中工艺参数选取的依据。新加坡南洋大学用人工神经网络对多 WEDM 加工过程建立经验模型，根据脉冲宽度、脉冲间隔、线张力、线速来预测切割速度、表面粗糙度和表面波度。他们所进行的初步研究提供了一种新的思路和方法。

上海交通大学研究人员在大量工艺试验的基础上，借鉴前人的研究成果，建立了高速走丝电火花线切割加工的人工神经网络模型，利用此模型开发了高速走丝电火花线切割加工工艺效果仿真系统。该仿真系统不仅可以进行工艺效果的预测和工艺参数的优化，而且还可以根据需要进行某些难以加工试样的仿真试验，获得了较好的效果。

2.2　电火花线切割加工神经网络模型

利用神经网络对输入输出的映射能力，可以建立电火花线切割加工过程 BP 模型，模拟电火花线切割过程，为电火花线切割加工的计算机仿真和智能化系统研究和开发提供可靠的依据。

（1）人工神经网络原理

人工神经网络（Artificial Neural Network，ANN）以神经科学和生理学的基本研究成果为基础，从不同的侧面，在一定程度上抽象、简化并再现了人脑在信息存储、搜索和处理等方面的某些原理，进而深入研究这些原理应用于各个领域的可能性和途径。对人工神经网络的研究不仅加深了人们对思维和智能的认识，而且作为解决问题的一种思想方法，开辟了一条崭新的模拟人类智能化活动的道路。人工神经网络已经发展成为涉及系统论、信息论、控制论、计算机科学、数学、物理、力学、哲学、心理学等研究领域的高度综合性的新兴边缘学科。

人工神经网络是由大量简单的非线性处理单元，以某种拓扑结构，广泛地相互连结而成的高度非线性（动力学）系统。人工神经网络的拓扑结构概括地讲有前馈网络和反馈网络两种。前馈网络中任何一个神经元的输出不能作为同一层或前几层节点的输入。而反馈网络中节点的输出可以转向作为同一层或前几层节点的输入。

神经网络的工作过程主要有两个阶段组成。一个阶段是工作期，此时各联结权值固定，计算单元的状态变化，以求达到稳定状态。另一个阶段是学习期，此阶段各计算单元状态不变，各联结权值和阈值可修改。相应的权值和阈值的调整确定过程为学习过程。学习方式分为有导师（监督）学习和无导师（非监督）学习两种。常见的学习规则有：Hebb 规则、δ 规则、模拟退货规则、误差反向传播规则、竞争学习规则以及 ART 规则等。

大量性能简单的神经元可组成一个结构复杂、性能完善的系统以完成复杂任务。神经网络有它自身的特点。

1）数据处理朝大规模并行型发展和数据存储的分布性，使神经网络在工作时具有较高的速度。

2）具有容错和容差能力、整个网络具有很强的鲁棒性。

3）有自组织、自学习、联想记忆等功能。

4）适合于求解难于找到好的求解规则的问题。

有代表性的有：自适应共振理论（ART）、双向联想记忆（BAM）、BP、Boltzmann 机/Cauchy 机 、Hopfield 神经网络和 Madaline 等。

（2）BP 网络设计

BP（BackproPagation）算法是一个有效的算法，其模型已成为神经网络的重要模型之一。BP 网络是单向传播的多层前馈网络，由输入层、输出层和隐含层（可以为一层或多层）组成，电火花线切割加工的 BP 神经网络，输入层取为四个单元：工件厚度、脉冲宽度、脉冲间隔和脉冲峰值电流；输出层有两个单元：切割速度和表面粗糙度。研究结果表明，一个三层的 BP 网络可以完成任意的 N 维到 M 维的映射。针对本问题，选用一个隐含层的 BP 网络。隐单元数的选择是一个十分复杂的问题，一般来说网络隐单元数太少可能不能训练好网络，或网络不强壮，不能识别以前没有学习过的样本，容错性差；但隐单元数太多又使学习时间过长，误差也不一定最小，因此存在一个最佳隐单元数。通过试错实验，确定最佳隐单元数为 9。所建的线切割加工过程 BP 网络拓扑结构如图 3.6-13 所示。



网络的初始权值对学习能否收敛影响很大，用 [-0.5, +0.5] 区间内的随机数初始化权值。几个网络参数的选择，如学习因子、动量因子、网络误差终止值等，对 BP 网络至关重要。

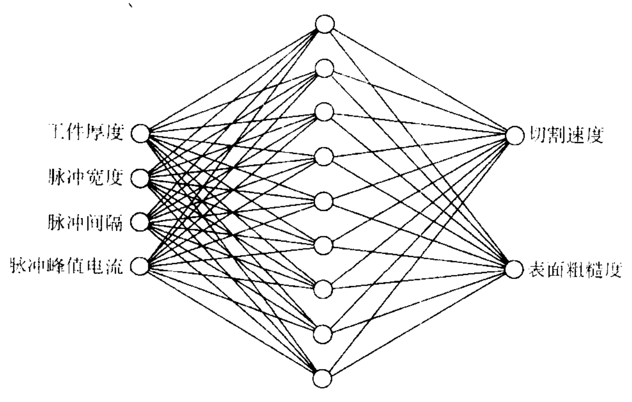


图 3.6-13 线切割加工过程 BP 网络拓扑结构

(3) 网络学习与训练

为尽可能避免局部极小问题并提高网络学习速度，采用改进的 δ 学习规则。对于某一个输入向量 X_k，网络输出为 Y_k，期望输出为 $\overline{y_k}$，节点 i 的输出为 O_{ik}，节点 j 的输入为 net_{jk}，节点的转换函数选用非对称性作用函数 $f(x)=\frac{1}{1+e^{-x}}$，其学习公式如下：

1)
$$\Delta w_{ij}(k+1)=\eta\delta_i o_j+a\Delta w_{ij}(k) \tag{3.6-5}$$
$$w_{ij}(k+1)=w_{ij}(k)+\Delta w_{ij}(k+1)$$

2)
$$net_{jk}=\sum w_{ij}o_{ik} \tag{3.6-6}$$
$$o_{jk}=f(net_{jk})$$

3)
$$\delta_{ik}=-(y_k-\bar{y}_k)f'(net_{jk})\ (j\text{为输出节点}) \tag{3.6-7}$$
$$\delta_{ik}=f(net_{jk})\sum\delta_{mk}w_{mj}\quad (j\text{不为输出节点})$$

式中，η 为学习因子；a 为动量因子；δ_i 为网络节点 i 输出误差；k 为样本序号；w_{ij} 为节点 i 与节点 j 之间的联结权值。

网络误差评估公式采用误差平方和公式：

$$E=\sum_k(y_k-\bar{y}_k)^2$$

运行神经网络，调整参数，经过反复实验，确定较优的网络参数：学习因子 $\eta=0.4$，动量因子 $\alpha=0.9$，网络误差终止值取为 0.02。

BP 网络的学习过程由正向传播和反向传播组成。在正向传播过程中，输入信息从输入层经隐含层逐步处理，并传向输出层，每层神经元只影响下一层神经元的状态。如果在输出层不能得到期望的输出，则转入反向传播，将误差信号沿原来的连接通道返回，逐层修改各层间联结权值，直至网络误差达到精度要求。具体学习过程如图 3.6-14 所示。

(4) 基于 BP 网络的线切割加工仿真实例

线切割加工工艺效果是一个多变量、多参数的问题，工艺效果不仅与脉冲电源参数有关，还受众多非电因素影响，电极丝走丝速度、工作液化学成分、冲液速度、工件材料等均会对工艺效果产生作用，而且各工艺参数之间相互作用，使得建立工艺参数与工艺效果之间的数学模型十分困难，而且存在较大误差。由于人工神经网络具有自组织、自学习、联想记忆等功能，并具有分布性、并行性和高度鲁棒性等特性，十分适于复杂系统建模。利用 BP 网络模拟线切割加工实际过程输入输出之间的复杂函数关系，建立线切割加工的人工神经网络模型。在此基础上可建立加工工艺效果的预测系统。实现加工工艺效果预测和工艺参数优化选取，总体结构如图 3.6-15 所示。

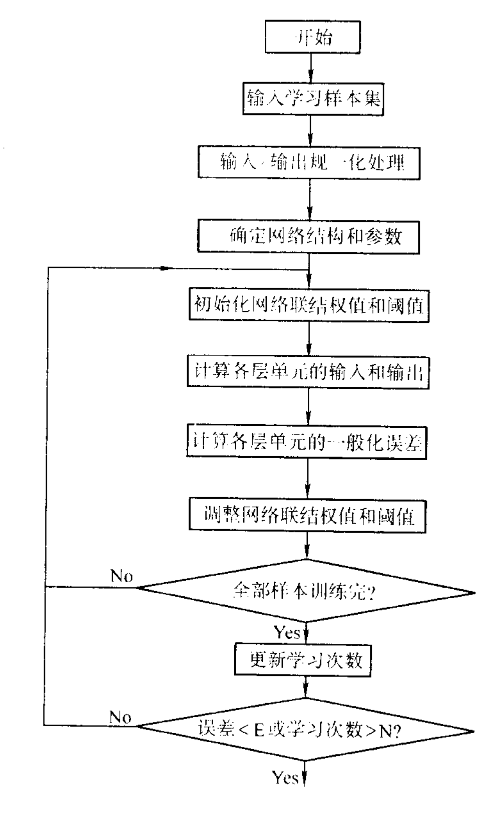


图 3.6-14 BP 网络学习过程图

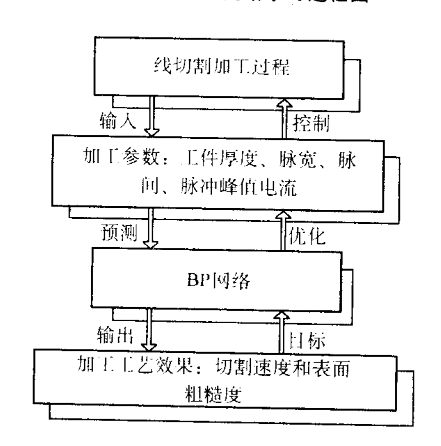


图 3.6-15 线切割加工工艺效果预测和工艺参数优选总体结构图

预测系统由两个模块组成：训练模块和预测模块。训练阶段，给 BP 网络输入学习样本，包括加工工艺参数（工件厚度、脉冲宽度、脉冲间隔和脉冲峰值电流）以及工艺效果（切割速度和表面粗糙度）。BP 网络对学习样本的输入输出进行归一化处理，将各参数变换到 (0, 1) 区间。用 (-0.5, 0.5)之间的随机数初始化权值和阈值。然后网络进行有教师学习，输入信号从输入层经隐含层传向输出层，将网络输出与教师信号进行比较，若网络误差未达到精度要求，则转入反向传播，逐层修改各层间联结权值和阈值，直至 BP 网络收敛，将网络参数、联结权值、阈值存入数据文件，以用于预测。为提高 BP 网络的预测精度，还可增加学习样本对 BP 网络进行再训练。从数据文件中读出网络参数、联结权值和阈值，用所建的 BP 网络进行工艺效果预测。对于设定的加工条件，用户输入加工工艺参数，预测系统可给出相应的加工工艺效果。



在 DK7725 高速走丝线切割机床上进行工艺试验，得到网络学习的样本集。将学习样本输入、输出参数进行归一化处理，使各参数的范围在（0，1）之间，然后以此作为 BP 神经网络的输入和输出，进行学习和训练。结果证明，具有 4-9-2 结构的 BP 神经网络能很好地逼近线切割加工实际过程。BP 模型的网络误差在训练过程中很快趋近于 0，网络最终学习精度达 0.013。

用 BP 网络对铁基合金线切割的切割速度和表面粗糙度预测结果如表 3.6-3 所示。BP 网络对切割速度和表面粗糙度的平均预测误差分别为 3.2% 和 3.4%，网络的精度比较高。

从表中结果可以看出，用 BP 网络预测的工艺效果值与工艺试验结果十分接近，用 BP 网络建立工艺效果预测系统是可行的，预测精度较高，能反映线切割加工实际过程。

表 3.6-3 BP 网络对铁基合金线切割的切割速度和表面粗糙度预测结果

加工条件				切割速度/$mm^2 \cdot min^{-1}$			表面粗糙度 R_a/μm		
厚度/mm	脉宽/μs	脉间/μs	脉冲峰值电流/A	试验值	预测值	误差/%	试验值	预测值	误差/%
5	6	198	6	3.6	3.560	1.1	1.3	1.339	3.0
5	6	78	6	7.8	8.065	3.4	1.8	1.676	6.9
5	12	144	10	21.1	22.402	6.2	2.8	2.807	0.3
5	18	216	10	23.1	23.737	2.7	3.5	3.513	0.4
5	24	264	13	33.0	32.868	0.4	4.5	4.582	1.8
5	30	300	13	34.9	35.466	1.6	5.5	5.497	0.1
5	36	324	16	47.6	46.857	1.6	6.5	6.225	4.2
20	6	90	6	8.0	7.330	8.3	1.2	1.298	8.1
20	6	72	6	13.0	12.543	3.5	1.5	1.357	9.5
20	12	144	10	22.5	21.568	4.1	2.3	2.171	5.6
20	21	252	13	34.3	32.232	6.0	3.0	2.861	4.6
20	30	300	13	40.6	39.904	1.7	3.7	3.594	2.8
20	36	324	16	50.5	53.502	5.9	4.2	4.380	4.2
20	42	378	16	54.5	52.486	3.6	4.7	4.706	0
20	48	432	20	58.5	57.588	1.5	5.2	5.140	1.1
20	48	288	20	82.8	84.239	1.7	5.5	5.579	1.4
50	6	72	6	4.2	4.697	11.8	1.0	1.267	26.7
50	9	108	10	13.3	14.150	6.3	1.7	1.816	6.8
50	15	180	10	15.2	16.162	6.3	2.2	2.211	0.5
50	21	252	13	26.9	27.732	3.0	2.6	2.683	3.1
50	30	300	13	38.6	36.701	4.9	3.2	3.203	0.1
50	42	378	16	48.8	49.999	2.4	3.9	3.908	0.2
50	48	432	20	54.4	57.161	5.0	4.5	4.301	4.4
50	48	288	20	83.3	78.891	5.3	4.9	4.813	1.7
50	48	144	20	121.5	122.298	0.7	5.2	5.187	0.3
100	12	144	10	15.3	14.186	7.2	2.2	2.022	8.0
100	21	252	13	26.7	25.649	3.9	2.7	2.717	0.6
100	30	300	13	32.9	32.117	2.3	3.3	3.179	3.6
100	42	378	16	44.3	45.016	1.6	3.8	3.873	1.9

续表 3.6-3

加工条件				切割速度/$mm^2 \cdot min^{-1}$			表面粗糙度 R_a/μm		
厚度/mm	脉宽/μs	脉间/μs	脉冲峰值电流/A	试验值	预测值	误差/%	试验值	预测值	误差/%
100	48	432	20	54.1	53.322	1.4	4.2	4.263	1.5
100	48	288	20	68.6	70.067	2.1	4.6	4.710	2.3
100	48	144	20	123.5	123.183	0.2	5.0	5.02	0.4
200	21	273	10	15.4	15.585	1.2	2.4	2.286	4.7
200	21	252	13	21.8	21.967	0.7	2.6	2.669	2.6
200	30	300	13	28.7	28.055	2.2	3.0	3.094	3.1
200	39	390	16	30.8	31.641	2.7	3.4	3.465	1.9
200	39	351	16	41.7	40.295	3.3	3.9	3.773	3.2
200	48	432	20	50.4	49.408	1.9	4.3	4.216	1.9
200	48	288	20	70.1	70.438	0.4	4.7	4.691	0.2
200	48	144	20	148.1	148.145	0.1	5.0	4.997	0.1

2.3 高速走丝电火花线切割加工工艺效果仿真系统

我国的高速走丝电火花线切割加工已取得了长足进步，但一直存在重设备、轻工艺的倾向，造成工艺落后的局面。

1）线切割加工工艺参数的选取在很大程度上仍依赖于操作者的经验，或根据工艺参数表进行近似选取，工艺参数设置不合理，严重影响机床能力的发挥。

2）线切割加工还不能根据加工参数预测工艺效果，无法适应现代制造环境的要求。

3）线切割加工使用的参量多，相互影响且关系复杂，并随机变化。我们对加工机理、工艺规律的研究不够，主要原因在于工艺试验没有系统开发以及研究手段没有创新。

4）国产高速走丝线切割机床的电源、控制系统、数控系统、指令代码等各不相同。高速走丝线切割加工工艺技术决定于特定的机床条件，无统一的标准可依据。

为了解决上述问题，促进我国线切割加工工艺水平的提高，有必要建立高速走丝电火花线切割加工工艺效果仿真系统。该系统可预测线切割加工工艺效果，优化选取工艺参数，在计算机上进行仿真实验，并适用于各种类型的高速走丝线切割机床。

（1）仿真系统结构

高速走丝电火花线切割加工工艺效果仿真系统结构如图 3.6-16 所示。该系统包括的主要模块如下。

1）训练模型模块　不同的高速走丝线切割机床，其加工参数代号所对应的实际值不同。根据实际加工条件，设置加工工艺条件相应的参数项。针对不同高速走丝线切割机床和加工工艺条件，用户进行完备的工艺试验，通过工艺数据库管理模块，新建工艺数据库或对已有工艺数据库进行更新。以工艺数据库为样本库，训练人工神经网络，可得到相应的仿真系统。

2）工艺效果预测模块　对于设定的加工条件，使用所建预测模型，对给定的加工工艺参数，可预测出线切割加工的工艺效果，并对工艺效果进行分析。

3）工艺参数优化模块　给定待加工工件的厚度，输入期望的加工工艺效果，运行优化模型，在满足加工要求的前提下，使加工规准最优，实现表面粗糙度最小，表面质量最优，并尽可能提高切割速度。

4）工艺规律研究模块　影响工艺效果的因素很多，包

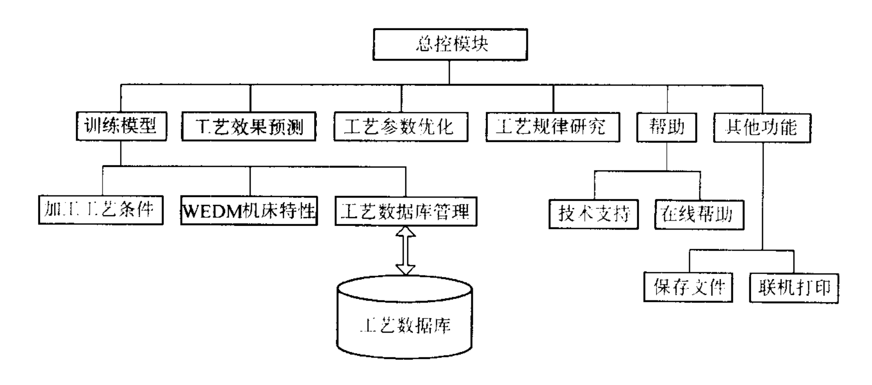


图 3.6-16 高速走丝电火花线切割加工工艺效果仿真系统结构

括电参数和非电参数，其中，电参数的影响非常重要。本模块着重研究脉冲参数对工艺效果的影响。

5）帮助模块 该模块为用户提供技术支持。并且，在用户使用仿真系统的时候，提供在线帮助，方便用户学习和操作。

6）其他功能模块 系统提供保存文件、联机打印等功能，用户可对工艺数据、运行结果等进行保存或打印。

（2）仿真系统的功能模块

1）工艺效果预测模块 利用 BP 神经网络对输入输出的映射能力以及能进行自学习的特点，建立线切割加工的人工神经网络模型，在此基础上可实现快速走丝线切割加工工艺效果的预测。BP 网络采用改进的 δ 学习规则对学习样本进行学习，不断修改网络参数、联结权值和阈值，直至网络收敛，将 BP 网络的参数、联结权值和阈值存入数据文件。工艺效果预测模块从数据文件中读取网络参数、联结权值和阈值，用所建的 BP 网络进行工艺效果预测。对于设定的加工条件，用户输入加工工艺参数，预测系统可给出加工工艺效果。

用户所选择的预测模型，输入加工工艺参数（工件厚度 H、脉外宽度 T_{on}、脉冲间隔 T_{off} 和脉冲峰值电流 I_m），可预测出相应的工艺效果（切割速度 V_w 和表面粗糙度 R_a）。工艺效果预测分为两种情况：一种是有工艺效果试验值，还有一种是无工艺效果试验值。若有工艺效果试验值，预测模块可对工艺效果的试验值和预测值进行对比分析，并给出误差分析结果。

2）工艺参数优化模块 优化线切割加工工艺参数的目标是在满足加工要求的前提下，尽可能提高切割速度，减小表面粗糙度，改善表面质量。在用 BP 网络建立的高速走丝线切割加工仿真模型的基础上，输入待加工工件的厚度 H 和允许的最大表面粗糙度 R_a，仿真系统用模拟退火算法优化选出满足要求的加工工艺参数组（脉冲宽度 T_{on}、脉冲间隔 T_{off} 和脉冲峰值电流 I_m），并给出相应的最优工艺效果（切割速度 V_w 和表面粗糙度 R_a）。模拟退火算法不受网络初始初始条件的限制，不易陷入局部最小，可找到问题的全局最优解。

3）工艺规律研究模块 电火花线切割加工工艺效果的主要评价指标有切割速度和表面粗糙度。影响工艺效果的因

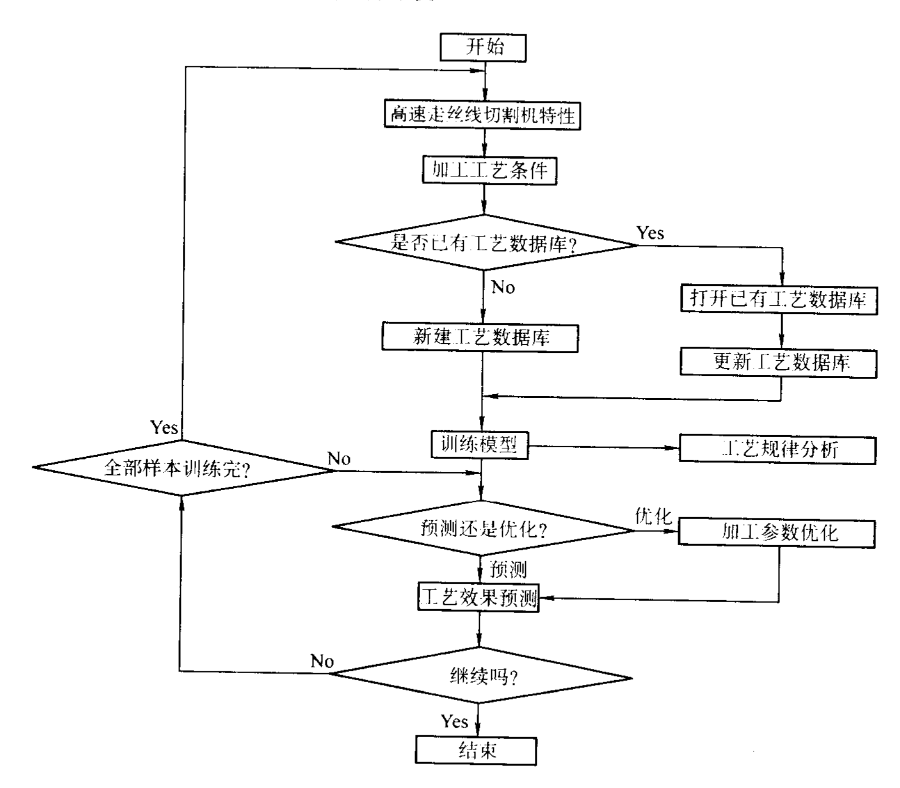


图 3.6-17 仿真系统通用性实现流程图

素非常复杂，脉冲电源、电极丝、工件、工作液、机械传动、控制系统等均会对工艺效果产生影响，其中脉冲参数的影响十分重要。本模块着重研究电参数（脉冲宽度 T_{on}、脉冲间隔 T_{off} 和脉冲峰值电流 I_m）对工艺效果的影响。用仿真手段研究线切割加工规律，既可研究稳定加工时的机理，又可将研究范围拓展到不稳定加工区以及实际加工难以实现的加工条件。

(3) 仿真系统的通用性

目前国产高速走丝线切割机床大多没有进行系统而全面的工艺试验以及建立相应的工艺数据库。各种型号、规格的高速走丝线切割机从硬件到指令代码都不相容，无统一的标准可依据。而且由于各机床的边界条件不同，加工工艺参数与工艺效果间的关系各异。此外，线切割加工过程随机性、复杂性强，涉及的干扰因素多。这些都使得建立一个对各种型号、规格的高速走丝线切割机床都适用的仿真系统相当困难。

为使所开发的仿真系统具有通用性，可以通过训练模型功能加以实现。不同的高速走丝线切割机具有不同的机床特性，在设定的加工条件下，建立相应的工艺数据库（即样本库）。使用 BP 网络对新的样本库进行学习，可获得此条件下的线切割加工工艺过程仿真模型。在此基础上，可预测工艺效果；同时应用模拟退火算法对工艺参数进行优化，能给出最优的加工参数。仿真系统通用性的实现如图 3.6-17 所示。

训练模型主要包括输入机床工艺参数代码、设置加工工艺条件和工艺数据库管理三部分。针对用户所用的线切割机床，在设定的加工工艺条件下，对相应的工艺数据样本建立符合用户要求的高速走丝线切割加工工艺过程仿真模型。

1）机床工艺参数代码　高速走丝线切割机床的用户调节的主要参数有脉冲宽度、脉冲间隔和脉冲峰值电流。脉冲参数的调节采用数字显示、有级调节，十分方便和直观。机床型号不同，脉冲参数代码所对应的实际值不同。其中脉冲间隔的代码在某些机床上对应于实际值，而在另一些机床上对应于脉冲间隔与脉冲宽度的比值，可依据用户所用机床选定。

图 3.6-18 为输入机床的工艺参数代码的界面。用户通过单选按钮选中脉冲参数，用“增加代号”来添加相应脉冲参数的代码及所对应的实际值。若需要修改，首先选中待修改项，用“删除代号”删除此项。此外，脉冲间隔代号对应的值根据用户所用机床确定。若脉冲间隔代号对应于实际值，则“脉冲间隔/脉冲宽度”不选中；若对应于脉冲间隔与脉冲宽度的比值，则选中“脉冲间隔/脉冲宽度”。用户确定机床工艺参数代码后，仿真系统会根据机床特性自动将工艺参数代码转换为对应的值。

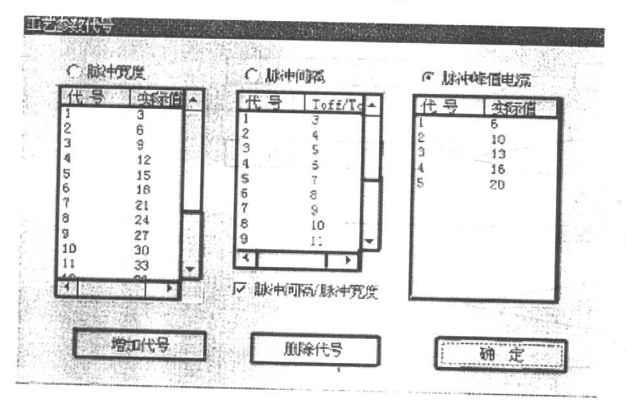
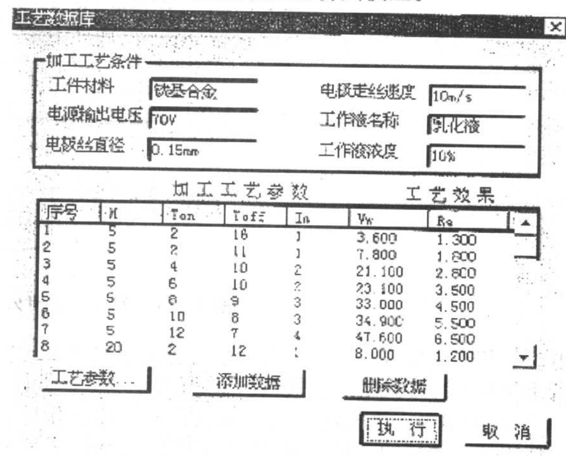


图 3.6-18　机床工艺参数代码

2）加工工艺条件　用户通过图 3.6-19 所示界面设定进行工艺试验的加工工艺条件：工件材料、电源输出电压、电极丝直径、电极丝走丝速度、工作液名称和工作液浓度。对于设定的加工条件，建立相应的仿真模型。



序号	H	Ton	Toff	Im	Vw	Ra
1	5	2	16	1	3.600	1.300
2	5	2	11	1	7.800	1.800
3	5	4	10	2	21.100	2.800
4	5	6	10	2	23.100	3.500
5	5	8	9	3	33.000	4.500
6	5	10	8	3	34.900	5.500
7	5	12	7	4	47.600	6.500
8	20	2	12	[illegible]	8.000	1.200

图 3.6-19　加工工艺条件及工艺数据库

3）工艺数据库　用户可通过工艺数据库管理功能新建工艺数据库或打开已有工艺数据库进行更新。用户进行完备的工艺试验，获得典型的工艺数据，建立工艺数据库（即样本库）。通过对样本库的学习训练，可得到线切割加工的仿真模型。若需要进一步提高模型精度，可打开已有工艺数据库，添加新的学习样本，用 BP 网络对新样本进行再学习，不断提高模型精度。据作者体会，工艺数据样本呈正态分布时，训练后的模型精度较高。

图 3.6-19 示出新建数据库的界面。用户通过“添加数据”，将工艺数据样本输入，其中脉冲宽度 T_{on}、脉冲间隔 T_{off} 和脉冲峰值电流 I_m 输入值为相应机床的工艺参数代号。工件厚度 H、表面粗糙度 R_a 和切割速度 V_w 为实际值，单位分别为 mm、μm 和 mm^2/min。能用“删除数据”删除某些需要修改的数据。建立好工艺数据库后，系统将它存入数据文件。若需要对工艺数据库进行更新，系统打开相应数据文件进行操作。

用户输入机床工艺参数代码，设置了加工工艺条件，并建立工艺数据库，仿真系统即开始训练模型，建立起满足用户要求的线切割加工过程的人工神经网络模型。

2.4　大厚度切割仿真系统

大厚度零件的大量出现对电火花线切割加工提出了更高的要求。一般的高速走丝线切割机床只适应加工 100 mm 以下厚度的工件，当工件厚度超过 100 mm 时，加工稳定性下降，加工精度和表面粗糙度都不能达到加工要求，加工难以进行。为适应生产制造的要求，需要深入研究大厚度工件线切割加工的工艺规律，提高加工稳定性，改善工艺效果。但是用传统的工艺试验方法研究大厚度线切割加工存在很大的困难。这不仅受到机床结构的限制，而且随着工件厚度的增加，工作液难于进入切缝，使得切缝中电蚀产物很难排出，会堆积在切缝中。而电蚀产物的堆积又使工作液流量减小，电极丝得不到及时冷却，烧断电极丝，致使加工过程中断，使大厚度切割试验难于进行。因此，对大厚度线切割加工，很难进行系统的工艺试验来研究其加工机理。在已开发的线切割加工仿真系统基础上，对大厚度工件线切割加工进行仿真实验，在计算机上进行虚拟加工，不受实际加工中诸多因素的限制，可以进行实际加工中难以进行的工艺试验，并能获得仿真结果。通过对仿真结果的分析，得出解决大厚度线切割加工的排屑问题的方法，并从理论分析和工艺试验两个

方面加以验证。

进行大厚度线切割加工时，进入切缝的工作液的量很少，排屑是面临的主要问题。在加工过程中，脉冲参数对大厚度工件线切割加工的影响非常显著。脉冲参数值决定了放电能量、放电频率和放电间隙状态，它的合理与否同放电加工是否稳定有密切关系。因此，要通过仿真实验研究三个主要的脉冲参数（脉冲峰值电流 I_m、脉冲宽度 T_{on}和脉冲间隔 T_{off}）对加工过程的影响。

上海交通大学自主开发的高速走丝线切割加工工艺效果仿真系统，针对 DK7725 高速走丝线切割机床进行了仿真实验。实验设定了不同的脉冲参数组合（I_m，T_{on}，T_{off}），在各参数组合下，仿真预测出各工件厚度 H 所对应的切割速度 V_w。实验结果如表 3.6-4 所示，图 3.6-20 给出了相应的实验曲线。

表 3.6-4　不同脉冲参数和工件厚度对应的切割速度

脉冲参数	工件厚度/mm												
	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	150	200
	切割速度/mm^2.min^{-1}												
I_m = 6 A T_{on} = 6 μs T_{off} = 30 μs	9.7	12.4	14.2	13.2	9.5	5.8	—	—	—	—	—	—	—
I_m = 6 A T_{on} = 12 μs T_{off} = 36 μs	17.4	19.1	20.5	21.6	20.9	19.7	19.2	18.6	17.0	15.5	14.8	—	—
I_m = 12 A T_{on} = 6 μs T_{off} = 30 μs	26.1	27.6	29.1	30.2	30.4	28.7	27.8	27.4	26.3	25.5	23.7	—	—
I_m = 12 A T_{on} = 48 μs T_{off} = 144 μs	34.7	36.9	39.4	40.5	41.6	40.8	40.2	39.8	39.3	38.6	34.7	33.4	28.9
I_m = 24 A T_{on} = 24 μs T_{off} = 120 μs	—	—	81.3	82.0	82.6	83.3	82.8	82.3	81.2	80.4	79.2	74.6	65.4

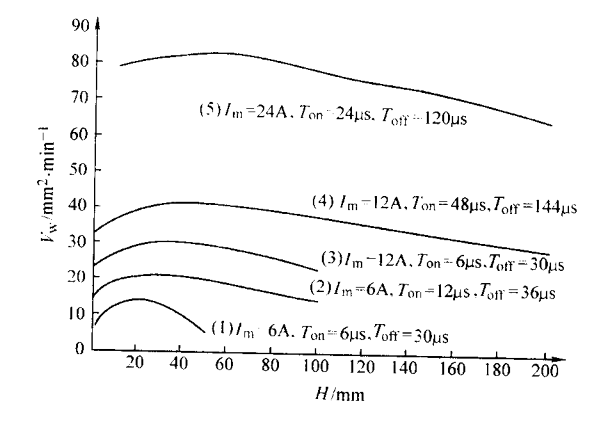


图 3.6-20　不同脉冲参数下切割速度与工件厚度的关系

对于图中每一条曲线，脉冲参数确定后，总有一个最佳的工件厚度值对应于切割速度的最大值。工件厚度处于最佳值时，脉冲放电的效率最高，工件厚度过小或过大，切割速度均有所降低。工件薄时，间隙放电加工面积小，由于跟踪速度受到限制而出现大量空载波形，使平均加工电流低，有效输出功率小，切割速度较低。随着工件厚度的增加，切割速度增大，达到适当值时，切割速度达到最大，此时的放电效率最高，再增加工件厚度，切割速度反而降低。因为厚度太大，电蚀产物排出条件变坏，加工稳定性变差，脉冲利用率低，导致切割速度降低。比较图 3.6-20 中（1）、（2）两条曲线发现：曲线（2）保持脉冲峰值电流不变，脉冲宽度增大到曲线（1）的 2 倍，则切割速度提高，最佳工件厚度值增大。脉冲宽度的增大，可增大放电能量，利于切割速度和切割厚度的增大。曲线（1）与曲线（3）的脉冲宽度相同，脉冲峰值电流从 6 A 增大到 12 A，曲线（3）的切割速度和最佳工件厚度均增大，并且效果比曲线（2）明显。增大脉冲峰值电流，使放电能量增大，放电间隙增大，同时会增强脉冲放电时的爆炸力，这些因素都有利于电蚀产物的排出，可以提高加工稳定性，使切割速度提高，切割厚度增大。同时增大脉冲宽度和脉冲峰值电流，曲线（4）中脉冲峰值电流增大到 12 A，脉冲宽度增大到 48 μs；曲线（5）中脉冲峰值电流增大到 24 A，脉冲宽度增大到 24 μs，使得曲线（4）与曲线（5）的脉冲放电能量近似相同。从图中曲线可知，随着脉冲峰值电流的提高，切割速度增大，曲线的峰值点右移，能够进行稳定线切割加工的工件厚度增大；脉冲宽度的增大也可提高切割速度和切割厚度，但不及增大脉冲峰值电流的效果显著。脉宽增大，可增大放电能量，利于切割速度和切割厚度的提高。脉冲峰值电流确定后，脉冲宽度要根据加工条件选择适当的值。

脉冲间隔也是影响大厚度工件线切割加工的重要因素，可通过仿真实验研究脉冲间隔的作用，取脉冲宽度 T_{on} = 48 μs，脉冲峰值电流 I_m = 20 A，在不同的厚度下，改变脉冲间隔，得到不同的切割速度，表 3.6-5 给出了仿真结果。

从表 3.6-5 中的数据可以看出，切割大厚度工件时，脉冲峰值电流和脉冲宽度确定后，适当减小脉冲间隔可提高脉冲放电频率，使切割速度增大。但随着脉冲间隔的减小，加工稳定性变差。这是因为大厚度线切割加工时，脉冲频率的减小，使得电蚀产物没有充分的时间从放电间隙中排出，可能会引起电蚀产物的堆积，影响加工的稳定性。

通过仿真实验可知，增加脉冲峰值电流可增大放电间隙，改善切缝中工作液的流动状态，有助于解决大厚度线切割加工的主要问题——排屑问题，使得切割速度和切割厚度提高。同时，可适当增大脉冲宽度，减小脉冲间隔，来提高切割速度，但必须在合适的范围内，以保证加工过程的稳定进行。

表 3.6-5　脉冲间隔对大厚度线切割加工的影响

厚度 /mm	脉冲宽度 /μs	脉冲间隔 /μs	峰值电流 /A	切割速度 /mm²·min⁻¹
50	48	432	20	57.1
100	48	432	20	53.3
200	48	432	20	49.4
50	48	288	20	83.3
100	48	288	20	68.9
200	48	288	20	67.5
50	48	144	20	122.3
100	48	144	20	123.2
200	48	144	20	148.1

2.5　其他仿真方法在电火花线切割中的应用

（1）有限元仿真系统

知名的电加工设备生产厂商为了提高产品精度，在现代机床设计中均对机床结构的力学性能和热稳定性进行了理论分析和模拟研究，并基于此在设计制造中采取一系列的措施。如瑞士的阿奇公司即利用了 FEM 方法对其机床的静态、动态刚度和热变形进行了模拟分析。针对机床的热变形分析采用恒温水冷却立柱进行改善。ROBO FIL2030SI 机床的工作液（高纯水）有一套换热装置，控制水温在（20±0.5）℃范围，用专门的循环水泵将其川流不息地在立柱冷却管道中通过，不管室温如何变化，立柱温度不变。例如室温在一昼夜中，从 20℃升到 27℃时，过去切割 80 mm 高的齿条，齿形对基面的垂直度将变化 6 μm，现在，立柱恒温，垂直度不变。瑞士的 Agie 公司为减少机床精度的变化对加工精度的影响，而采取了统一的温度场，其机床装有两套温度控制系统，分别控制加工区与 U、V 轴两轴的温度，及电源箱、机床与室温的空气冷却。两套温控系统通过温度计进行调整，使温差不超过 1℃。在工作台面上采用了韧性陶瓷新材料，具有绝缘、吸振、热稳定性好等特点，为高精度电火花线切割加工提供了有力的保证。

（2）加工过程模拟仿真

近年来国内外开发的电火花线切割加工的 CAD/CAM 系统，提供了强大的动态模拟仿真模块，能够动态地反应出电极丝的实际运动轨迹，产品加工过程具有实时动画功能。

3　电火花线切割加工 CAD/CAM 系统

3.1　概述

进入 20 世纪 90 年代后，随着计算机技术的发展和成熟，数控加工技术正发生着巨大的变化，原有的单片机数控系统也正逐渐被以微机为核心的群控系统（DNC）所取代，复杂烦琐的手工计算编程也正向图形化自动编程过渡，CAD/CAM 技术在电加工行业特别是高速走丝线切割加工中也得到了应用和发展。人们对高速走丝的 CAD/CAM 进行广泛的研究，开发了许多优秀的软件，能够对各种非圆曲线、含有样条及特殊曲线的图形进行处理，并生成加工轨迹文件。目前国内国外流行的 CAD/CAM 软件主要有 Unigraphics（UG）、Pro/Engineer、AutoCAD、SolidWorks、SOLIDEDGE、MDT、Cimatron、IDEAS、CATIA、Surfcam、Virtual Gibbs、Cimatron Cimatron、Master CAM、高华 CAD、CAXA 电子图板和 CAXAME 制造工程师、GSCAD98、金银花系统、开目 CAD 等。

AutoCAD 软件由于其强大的绘图和编辑功能及开放性 DXF 数据接口，已成为普遍采用的 CAD 设计、图形输入平台和自动编程的重要组成部分。AutoCAD 图形交换文件是一种专用格式的二进制码，以方便在 AutoCAD 内部的各种操作，但它不适应与其他图形软件进行图形数据交换，需要采用 DXF 文件或 IGES 文件作为中间文件来进行。这两种文件均为 ASCII 码。DXF 文件的结构由 4 个段（section）和文件结尾标志（EOF）组成，便于高级语言读取，其顺序为：标题段（HEADER）；表段（TABLES）；块段（BLOCKS）；实体段（ENTIEIES）；文件结束（END OF FIFE）。在这 5 部分中，与几何图形相关的几何信息都包含在实体段中，因此读取信息过程中其他段均可忽略。DXF 的实体段包含了实体信息，但人工阅读是相当困难的，为此需要编制接口程序读取，实现 DXF 文件数据格式向用户所需图形数据的转换，以供其他应用程序进一步分析计算用，其实体信息读取流程如图 3.6-21。

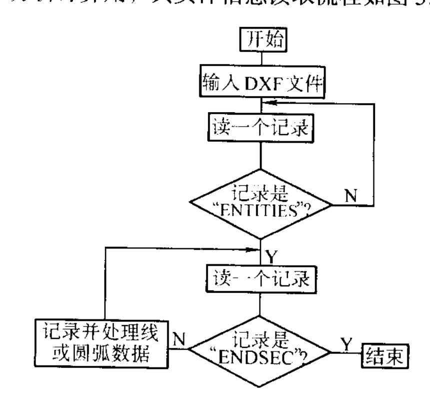


图 3.6-21　实体信息读取流程

在读取实体信息之前及其过程中，需要考虑线切割加工中的一些工艺要求。

1）放电间隙与加工钼丝半径在 AutoCAD 制图时应考虑，或利用 OFFSET 等距线命令。

2）读取实体信息后按线切割加工路径进行排序。

3）加工起始点用 AutoCAD 中的实体点来确定。这样生成一个按线切割顺序的中间文件。文件的格式是首先给出加工起始点坐标，中间段是实体信息，文件以 END 结尾。把从 AutoCAD 数据库中提取的实体信息经过高级语言处理，生成数控线切割机床 NC 系统需要的程序指令如 3B、4B、ISO 程序，实现线切割加工的 CAD/CAM 加工。

电火花线切割加工 CAD/CAM 系统的实现，可以大大缩短生产准备时间，优化加工组合条件，提高加工自动化程度。基于这些特点，国际上几大电加工设备制造厂商都对此给予了高度重视，并推出了较成熟的产品，如日本 SODICK 公司在上海推出的针对中国的 SODICK 低速走丝线切割机床用户的 CAD/CAM 系统，并取得了成功。该系统软件构成如图 3.6-22 所示。

但是 CAD/CAM 系统的应用仍具有其局限性。目前高速走丝线切割加工主要存在着以下几个问题。

1）缺乏一个系统的工艺参数数据库及其处理和优化方法，工艺参数不能自动选取，对操作人员的要求较高，自动化程度较低。

主机系统

图形输入　自动编程　工艺参数处理　加工仿真　通讯

图 3.6-22　系统软件结构

2）加工稳定性有待于进一步提高，仍然无法很好地解决加工中的断丝问题，这也是制约高速走丝线切割加工技术进一步发展的重要因素。

3）要大幅度提高国产高速走丝线切割机床的性能，亟待解决的问题还有走丝系统的稳定性问题、高效率脉冲电源、性能优良的工作液以及提高机床伺服性能与加工精度等，这些问题对线切割加工机床的整体性能的提高起着非常重要的作用。

上述这些问题也影响了高速走丝线切割加工 CAD/CAM 系统的开发和推广应用，甚至阻碍了线切割加工本身的发展，这也正是高速走丝线切割 CAD/CAM 关键技术。

3.2　电火花线切割加工的 CAD/CAM 系统

（1）高速走丝线切割加工 CAD/CAM 系统的总体结构

多年来，WEDM 的 CNC 控制软件和操作软件的结构和功能都在不断地发展，智能化的程度也越来越高，我们不仅要保持加工过程处于最佳状态，使加工过程能够连续稳定加工，实现真正的无人化加工，而且要自动选取和设定加工工艺参数，提高机床的自动化程度。瑞士 AGIE 公司的 AGIECUT EVOLUTION2 所配备的系统名为 AGIEVISION，其智能化功能只需定义加工对象，也就是一些有关零件的质量和加工目标就行，加工工序是自动生成的，形成了比较完善的电火花线切割 CAD/CAM 系统。三菱公司的专家系统业具有类似的功能，只需将加工对象的内容输入，便可得到所有的加工参数，这样，就使操作要求更为简化。SODICK 公司推出的 NF（神经模糊）电源，它不必输入复杂的 NC 代码，能自动选择加工调节，由定位至加工结束的整个过程，可根据 CRT 显示内容，以对话形式输入要求即可完成，特别是为操作提供了方便，省略了不必要的特殊内容，使得当今电加工机床成为一般人员也能使用好的机床，解决了电火花加工 CAD/CAM 系统中工艺参数设置长期依赖操作人员水平的问题。

作为有中国特色的高速走丝线切割机床在我国线切割行业中占据着主导地位。近十年来，在机床的结构、技术水平和工艺效果方面等方面都取得了可观的进步甚至是突破性的进展，如高速走丝线切割机床的多次切割工艺及超大厚度的突破、工作台的闭环控制能力以及线架刚性和热稳定性都有所提高，特别是 CNC 控制器都建立在微机上，绘图式编程系统得到了极大的应用。虽然很多单位专门针对高速走丝线切割机的 CAD/CAM 系统进行了大量的开发，但是大多集中在加工曲线或曲面的自动编程上，有关工艺参数优化选取尚未涉及，这是因为高速走丝线切割 CAD/CAM 系统的许多关键技术没有解决，如加工工艺参数数据库及其优化方法，加工过程稳定性的提高等。一个完整的高速走丝线切割机床的 CAD/CAM 系统的系统框架如图 3.6-23 所示。

从图 3.6-23 可以看出，一个完整的高速走丝线切割 CAD/CAM 系统应该包括：加工零件的设计和图形输入模块；机床电器控制模块、加工工艺参数的模块和加工过程的实时控制模块。对于第一部分，国内外已开发出了许多优秀的软件，能够对非常复杂的含有样条及特殊的异形曲线的图形进行处理，并生成加工轨迹文件，这一部分的工作已经取得了很大的成果。第二部分是机床电器控制模块，是 CNC 系统中最繁杂的子系统。

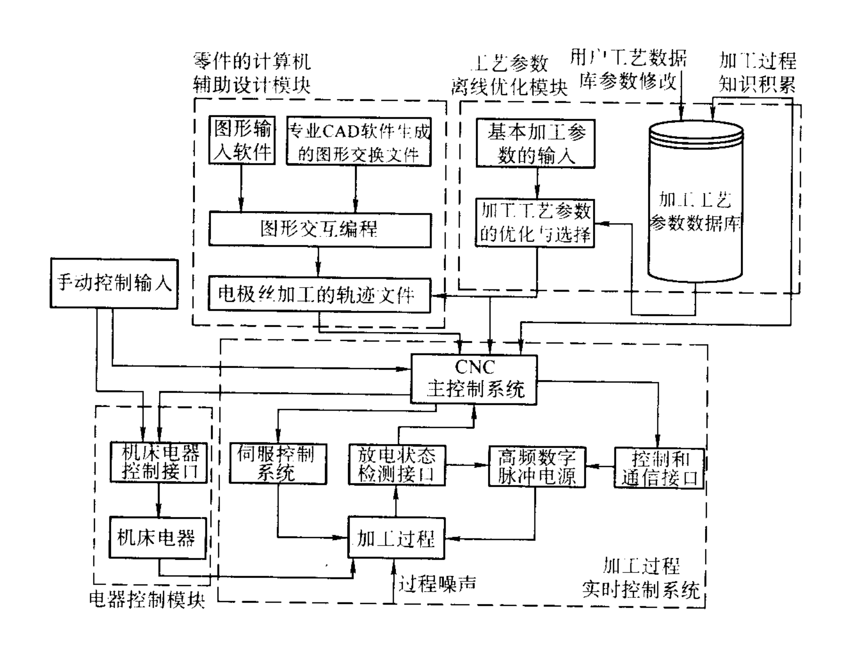


图 3.6-23　高速走丝线切割 CAD/CAM 系统的系统结构图

在高速走丝线切割系统中，电器控制子系统包括走丝系统控制、冲液控制、行程控制、回零控制和其他开关、继电器、工作液马达的控制等，有的机床还有恒张力控制装置。除张力控制外，几乎所有的电器控制都是开关工作方式，因此电器控制中最重要的任务就是定时和产生时序、中断处理、电器的驱动和电器状态采样等。电器控制子系统的结构图如图 3.6-24 所示。

其中，电器控制管理主要完成电器特性参数的管理，电

器控制命令的解释、时序数据、定时常数、电器状态的数据处理等任务，是电加工机床重要的组成部分之一，对于提高机床自动化程度，实现 CAD/CAM 一体化具有重要的意义；定时包括采样定时和时序发生的定时；时序发生器产生各电器的动作的时序脉冲或电平，产生电器之间的先后动作时序脉冲或电平；电器状态包括各电器的工作状况、电器自检的结果、控制对象的反馈信号等。

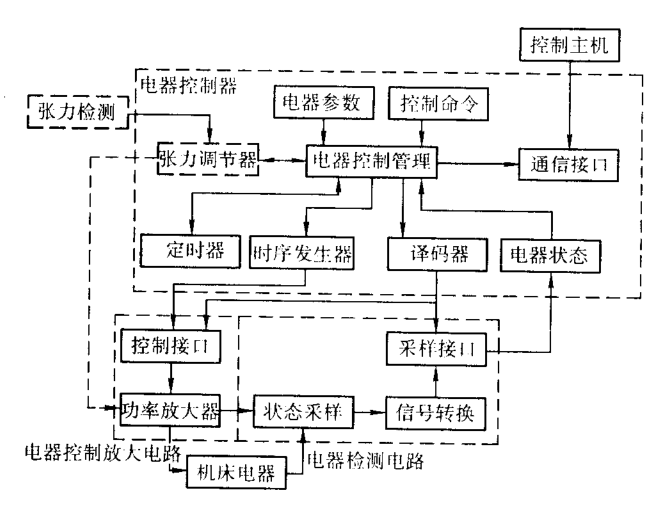


图 3.6-24　电器控制子系统的结构图

基于 CAD/CAM 集成化的线切割自动编程技术也成为线切割 CAD/CAM 系统的重要组成部分。所谓集成化自动编程技术是指编程者既可以对用计算机设计的结果直接进行线切割自动编程，也可以用系统本身的绘图功能将现有图纸快速输入再进行编程的系统。线切割中基本的 CAD/CAM 集成化技术如图 3.6-25 所示。

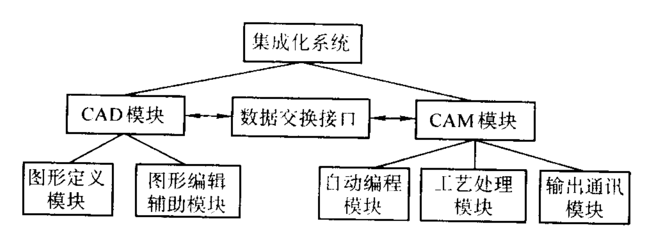


图 3.6-25　线切割 CAD/CAM 集成化技术

在 Internet 迅速发展的今天，网络化已成为计算机技术的发展趋势之一，开发基于 web 服务的客户/服务器方式的线切割 CAD/CAM 系统具有重要的现实意义。通过 CGI 进行操作的 CAD/CAM 系统服务器结构如图 3.6-26 所示。用户提供的零件信息可通过通用网关接口 CGI 进行处理，将线切割 CAD/CAM 系统的几何编程软件和工艺数据库扩展为基于 Internet的 Client/Sever 方式的分布式系统，实现远程线切割自动编程。

(2) 加工工艺参数优化

电火花线切割加工参数的优化设定是指选取合适的加工参数来获得最佳的加工效果。线切割加工中表示加工效果的工艺指标主要有切割速度、表面粗糙度、电极丝损耗和加工精度。加工参数主要是脉冲宽度、脉冲间隔、峰值电流、加工厚度、丝的张力、丝的进给速度等。在电火花线切割加工参数设定时，不存在满足所有的加工指标要求的惟一参数组合，但是对于已知的加工指标要求和加工条件，存在一个优化的参数组合使得加工稳定、高效地进行，这组优化的参数是通过优化技术来获得。

离线优化和在线优化问题是高速走丝线切割 CAD/CAM 系统的两项关键技术。所谓离线优化是指根据一系列的优化指标（在高速走丝线切割加工中主要是加工的表面光洁度或粗糙度 R_a 和加工速度 MRR）和已知条件（工件材料、厚度、电极丝的直径、工作液的种类等），对加工的工艺参数诸如空载电压、峰值电流、脉冲间隔、脉冲宽度、进给速度进行优化，并对加工的工艺参数进行自动选取。在线优化要解决加工过程的实时控制问题，即如何能使加工过程持续稳定而又高效地进行，避免断丝和短路闷死现象的发生。这两个问题是相辅相成的。一方面，如果加工前的工艺参数设置得不好，即使控制系统跟踪得再好，也不能保证加工能够顺利地进行，离线参数设置的不当，将影响控制的效果；另一方面，离线优化好的参数并不能保证加工过程一定能够按照预期的效果进行，电火花加工是一个相当随机的过程，加工过程中加工条件的变化如工件厚度和电极丝张力的变化，工作液污染程度的加深，电源电压的不稳定性等因素都会对加工过程产生影响，线切割的实时控制系统则必须实时调节各个控制参数，使加工过程既不短路闷死也不发生断丝烧丝现象，始终保持在最佳状态。这两个问题是解决现有高速走丝线切割加工 CAD/CAM 系统存在问题的关键。

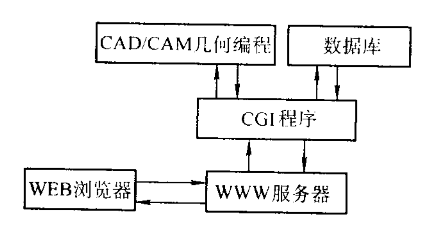


图 3.6-26　CAD/CAM 服务器的 CGI 结构

现已开发的电火花高速走丝 CAD/CAM 系统的加工工艺参数模块大多还不完善，这主要是由下列原因造成的。

1) 由于国内线切割加工机床分布不均，机床性能也各不相同，目前还没有一个完善的加工工艺参数的数据库，也就没有对加工的工艺参数组合优化和自动选取进行更为深入的研究。

2) 工艺参数实时控制困难，加工过程中加工条件会发生变化的，但控制系统往往无法灵敏地跟踪这种变化，因为进给系统并不能跟踪好任何加工条件下的间隙状态，而加工的工艺参数调节得不好便会严重影响加工的稳定性，并出现断丝现象。为了防止断丝，不少操作人员将加工电流尽可能减小，影响了加工速度的提高。

因此，人们希望尽早研制、发展一种能模仿熟练操作者的人类专家的思维，自动实现理想加工，获得理想工艺指标的智能化 WEDM 机床。所谓智能 WEDM 机床，其基本性能要求应包括两个方面：一是切割轨迹的自动编程与控制，二是工艺参数的自动设定。目前的 WEDM 机床 95% 以上都已实现数控化，在一些 NC 线切割机床上，具有多种自动编程功能，能做到将控制机与编程机合二为一。因而，可以说切割轨迹的自动编程与控制问题已得到了较好的解决。但是，对于工艺参数的自动设定问题，研究较少、发展较慢。这一问题的关键所在是采取何种策略，实现工艺参数的自动决策。

Scott、Boyina 和 Rajurkar 使用了全因素设计方法来对 WEDM 的控制参数进行优化组合，优化目标为粗糙度和蚀除速度，根据方差分析，他们发现脉冲宽度、脉冲间隔和峰值电流是相当重要的影响因素，他们总共作了 729 组试验，并筛选出 32 组作为优化结果，但是这种方法需要的试验数目太大，而且对于某一特定要求的粗糙度或放电间隙不能给出优化的加工参数。从实践角度上看，WEDM 工艺参数优化具有一定难度，更具体地说，作全因素试验从实践和经济方面



考虑都是不合理的。但是从另外一个角度讲，工艺参数的优化和自动选定是重要的。尽管控制系统能够缓解不恰当的加工工艺参数设置，但是，离线工艺参数设置不当，将影响控制的效果和加工过程的稳定性，从而影响加工的速度和粗糙度。操作人员根据经验设置的工艺参数往往不能同时满足加工速度和粗糙度为最优。由于放电加工过程相当复杂，而影响加工过程的因素又很多，要建立众多工艺参数和加工过程之间的精确数学模型是相当困难的。利用工艺数据正交表，并且利用回归相关分析，可建立工艺参数和加工过程之间的数学模型。并在约束条件下运用非线性方法对加工参数进行优化，以达到高效加工的目的。在优化参数的基础上，建立工艺参数的数据库管理系统，并可通过控制主机对自适应数字高频电源进行电参数设定，进一步完善高速走丝线切割加工的 CAD/CAM 系统。

解决工艺参数的优化和自动设定，必须首先解决两个问题：参数优化方法及工艺数据库系统的建立。

加工工艺参数优化所涉及的参数以电参数为主。评价工艺效果的指标主要是切割速度、加工表面粗糙度等。决定工艺效果的参数不外乎电参数和非电参数。由于电参数容易参数化调节，对工艺效果影响很大，所以线切割加工时，通常以调节电参数为主，非电参数如电极丝走丝速度、电极丝张力、工作液浓度等，则因高速走丝线切割机床固有的特点而难以实现参数化调节，这一点同慢走丝机床相比区别较大，对于非电参数只需调整到一个合理的小范围内即可，该范围对所有的电参数都是适用的，和加工要求无关。不同型号的机床对应的调节范围会有所不同。

工艺参数的自动决策可采用以下两种方式来实现。一是根据熟练操作者和专家解决问题的经验知识，建立工艺数据库，存入机床的计算机；加工时输入少量数据，机床用“IF-THEN”规则检索，提取相应的数据作为加工的工艺参数，如图 3.6-27 a 所示。另一种方法是将熟练操作者和专家的经验知识转换成决策数学模型，存入机床内，加工时根据工艺条件，通过推理运算求解模型，得到相应的工艺参数，如图 3.6-27 b 所示。

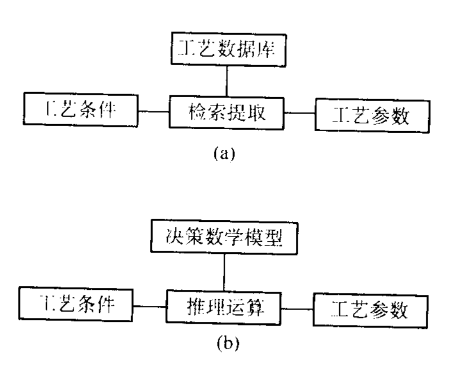


图 3.6-27 工艺参数的自动决策策略

以上两种策略都是将知识工程应用于 WEDM，方法一的核心问题是工艺数据库的建立，前提条件是必须具有充分多的、能涵盖各种加工条件和加工要求的经验数据或实验数据。由于线切割加工机理复杂，影响因素多，加工条件、加工要求千变万化，而目前各生产单位积累的历史数据往往不够充分，因而采用此种策略将存在数据不够准确、完整，适用不够普遍的问题，如果单纯靠试验来建立数据库，更会出现复杂性与完整性、准确性、适应性的矛盾，因而在目前条件下不太容易实现。方法二的核心问题是建立工艺参数自动决策数学模型。该方法也需要利用经验知识的历史数据来确定决策目标函数表达式，但在这里，不必要求数据能覆盖各种加工情况，只要求在利用这些数据确定各工艺指标与各工艺参数之间的关系时，数据量符合统计学要求，以保证目标函数的准确性、可信度，即使在没有任何历史数据的情况下，亦可通过主动性因子试验，根据有限的实验数据，按统计分析方法建立工艺指标与工艺参数之间的关系。显然，这时的试验比建立工艺数据库的试验，其复杂程度和工作量大大降低。

电火花线切割加工时，对加工速度、表面粗造度、加工误差都有要求，而这三者之间往往是相互矛盾的，不可能同时达到最优，因此在建立工艺参数决策数学模型时，多采用混合多目标优化数学模型。首先建立模型表示加工参数与工艺指标之间的关系，然后在此模型的基础上，构造目标函数采取优化算法来获得最优参数组合。目前加工参数与工艺指标之间主要有回归分析和人工神经网络两种建模技术。

回归分析是处理变量之间的相关关系的一种数理统计方法，它已广泛运用于工程和科学研究中。回归分析的一般步骤：求取实验数据；建立回归模型；对回归模型中的未知参数（回归系数）进行评估；对回归模型的可信度进行统计检验。其中，回归模型的确定是核心，一般是从理论上进行分析，确定模型的结构或根据经验确定。在电火花线切割中，由于对加工参数与工艺指标之间的相关性不明了，研究人员从数学处理上的方便一般是选取多项式作为回归模型，从而对线切割加工参数与工艺指标之间的相关性进行探索性研究。

美国 Nebra-Lincoln 大学的 K. P. Rajurkar 教授等人在实验数据的基础上，采用多元线性方程建立切割速度和表面粗糙度的线性模型，并发现线性模型对切割速度是较优的；新加坡的 T. A. Spedding 等人尝试用多元二次方程建立模型，对切割速度和表面粗糙度都取得了较满意的效果。研究表明：电火花线切割加工参数与工艺指标之间有较强的非线性，二次回归模型的精度要高于线性模型，但相应地，建立二次回归模型的实验工作量也要大得多。通过回归分析技术也表明每个加工参数对工艺指标的影响程度是不同的，对切割速度和表面粗糙度这两项工艺指标影响最大的是电参数，其次是冲液的压力和丝的张力。

目前线切割加工主要研究的工艺指标是切割速度和表面粗糙度。在确定的加工条件下，切割速度提高时，工件表面粗糙度等级就会降低，反之，要使工件表面获得较高的表面粗糙度等级，切割速度就会降低。线切割的优化参数就是使得在满足一定的表面粗糙度时获得最大切割速度，从而实现稳定、高效的加工，因此线切割优化参数问题是一个多目标优化问题，考虑的工艺指标越多，优化问题越复杂。一般多目标优化问题是转化为单目标优化问题来解决的。常见的方法是根据每个目标的重要程度，对其相应的模型函数分别赋予一个加权系数，从而构成统一的目标函数，这样线切割参数优化问题转化为一个单目标函数求解。目前用的优化算法有 Frank-Wolfe 算法、快速下降法和模拟退火法，其中的模拟退火法取得了较好的效果。

1）模拟退火法　对于单目标函数的优化方法，目前模拟退火法已成为大型优化问题的首选算法，而且已成功地运用到最优化领域中，因此也运用到线切割参数优化方面。模拟退火法是用模拟热熔化的金属退火过程来寻找全局最优化解的方法。在金属退火过程中，先加热使之熔化，使其中的粒子可自由运动，然后降低温度，使之形成低能态的固体，如果温度下降得足够慢，则金属一定会形成最低能的基态，这一过程和金属的初态无关。模拟退火法中的能量最低对应于目标函数的最小值。由于模拟退火算法引入随机扰动方程使系统克服局部的约束，从而保证系统最终获得全局最小解。而且模拟退火算法不像传统的优化方法那样计算下降梯度，因此适合各种类型的目标函数和约束条件，这些优点使

模拟退火算法非常适合电火花线切割加工参数的优化问题。

2）穷举法　穷举法是针对线切割机床特点的一种优化方法。由于电火花线切割机床的加工参数设置一般是分挡调节的，如对于评系列的调整线切割机电源的脉冲宽度调节分16挡。因此加工参数的选择是一个组合问题，当加工参数与工艺指标之间的模型建立后，对于每种参数组合，通过模型直接计算可以得到与加工参数组合相对应的加工工艺指标的组合，通过对工艺指标组合的优劣分析来获得优化参数。

美国的 Don Scott 和 Sreedhar Boyina 等人用穷举法来解决线切割参数优化问题。他们考虑的加工参数有放电电流、脉冲宽度、脉冲频率、丝速、丝的张力和冲液速度，共有720种组合。求得相应的工艺指标为切割速度和表面粗糙度。一个工艺指标组合形象地认为是点的坐标，在平面上画出这些点，最外层的点就是优化的工艺参数组合，共获得了32组。应该明确的是这些参数组合的优化“等级”是一样的，对于不同的加工要求选择不同的参数组合。这种优化的方法简单而有效，但当研究的加工参数较多时，计算量大。

（3）工艺数据库

用户可通过工艺数据库管理功能新建工艺数据库或打开已有工艺数据库进行更新。用户做完工艺试验，获得典型的工艺数据，建立工艺数据库（即样本库）。通过对样本库的学习训练，可得到线切割加工的仿真模型。若需要进一步提高模型精度，可打开已有工艺数据库，添加新的学习样本，用BP网络对新样本进行再学习，不断提高模型精度。据作者体会，工艺数据样本呈正态分布时，训练后的模型精度较高。

图3.6-28示出新建数据库的界面。用户通过“添加数据”，将工艺数据样本输入，其中脉冲宽度 T_{on}、脉冲间隔 T_{off} 和脉冲峰值电流 I_m 输入值为相应机床的工艺参数代号。工件厚度 H、表面粗糙度 R_a 和切割速度 v_w 为实际值，单位分别为 mm、μm 和 mm²/min。能用“删除数据”删除某些需要修改的数据。建立好工艺数据库后，系统将它存入数据文件。若需要对工艺数据库进行更新，系统打开相应数据文件进行操作。

工艺数据库

加工工艺条件

工件材料：镍基合金　电极走丝速度：10m/s

电源输出电压：70V　工作液名称：乳化液

电极丝直径：0.15mm　工作液浓度：10%

加工工艺参数　工艺效果

序号	H	Ton	Toff	Im	Vw	Ra
1	5	2	16	1	3.600	1.300
2	5	2	11	1	7.800	1.800
3	5	4	10	2	21.100	2.800
4	5	6	10	2	23.100	3.500
5	5	8	9	3	33.000	4.500
6	5	10	8	3	34.900	5.500
7	5	12	7	4	47.600	6.500
8	20	2	12	1	8.000	1.200

工艺参数　添加数据　删除数据

执行　取消

图3.6-28　加工工艺条件及工艺数据库

用户输入机床工艺参数代码，设置了加工工艺条件，并建立工艺数据库，仿真系统即开始训练模型，建立起满足用户要求的线切割加工过程的人工神经网络模型。

智能数据库技术是加工参数优化功能的实现技术。建立的数据库系统不再是被动地提供查询功能，而是由系统提供一个智能向导，在向导的指引下完成加工条件的输入，这样的人机界面友好，且避免可能导致的操作者疏忽某个加工参数的设定。当输入完成后，系统立即选择优化的加工参数，并通过控制软件驱动相应的硬件，实现优化控制一体化。数据库中的数据不再是传统意义上的机床在实验条件下的加工数据表，而是通过优化模型获得的优化参数组合。为减少实际选择参数的计算时间，数据中系统应储存常规加工条件下的优化参数组，以便加工时，由系统直接调用。

加工参数的自动优选功能是电火花线切割机床自动化加工中的一个重要组成部分，国内外的研究人员对其进行一定的研究，取得了一些成果，然而还有许多方面有待进一步研究：①建立模型时要选择对工艺指标影响大的加工参数，同时对工艺指标的研究不应只是切割速度和表面粗糙度，加工参数与电极丝损耗和加工精度的关系有待于研究；②优化算法须进一步改进，由于线切割加工优化问题涉及加工参数多，计算量大，须研究更好的算法来提高优化目标函数求解的收敛性和稳定性；③运用面向对象的数据库技术开发智能数据库，改善人机界面，增强系统的帮助功能，降低机床使用难度；在开发智能数据库时，要考虑到已建立的优化模型，从而可以自动更新优化模型来提高模型适应不同的加工情况的能力。

（4）高速走丝线切割加工的工艺数据库系统的建立

高速走丝线切割的工艺数据库系统的建立分为两部分，一是工艺数据的采集工艺即数据表的建立，二是数据库系统的建立（DBS）。

建立工艺数据库的目的是为了使电火花高速走丝线切割实现计算机辅助加工（CAM），它对提高机床的自动化程度，提高加工的工艺效果甚至加工过程的稳定性都有非常重要的意义。数据库常用的数据模型有层次模型、网状模型和关系模型，其中以关系模型最为普遍。对于已建成的工艺参数表，其数据模型也和关系模型最为匹配。

一种工件可以选用不同的电参数，一种电参数也可被不同工件所选用，分别得到相应的工艺效果。为减小数据冗余，尽可能避免数据重复存储，需建立三个数据库，分别为：工件库（工件号、材料、厚度）；电参数库（电参数号、峰值电流、脉冲宽度、脉冲间隔）；工艺效果库（工件号、电参数号、加工电流、切割速度、表面粗糙度、单边放电间隙、加工稳定性）。

建立数据库系统的结构如图3.6-29所示，实现对数据库的有效管理。

1）库管理　工艺数据库中数据要不断地更新，一些不再适用的数据将会删除或更改，新的数据将会增加，因此在工艺数据基础上建立的工艺知识将会更新；另一方面，在构建系统时不可能把全部知识收集起来，知识需要日积月累地形成。此外，机床应用中会出现一些新工艺，带来了新知识。对知识的更新有的要求人工进行，有的可自动进行，但这些都需要一个开放的工艺知识库，一个能对知识进行增删、修改的知识库是非常必要的。

对用户进行权限管理，分为一般用户和高级用户，只有高级用户才拥有库管理和数据管理的权力，以保证数据库安全性。高级用户可根据实际需要修改库结构，具有开放性和灵活性。

2）数据管理　包括数据的增加、删除和修改。因为工艺数据库系统以实验为基础，提供此功能可在实验基础上不断完善数据库。

3）工艺参数的优化选择　用户输入工件厚度和加工效果的要求，即允许的最大表面粗糙度，通过此模块可得到所有满足要求的电参数组，结果可能为多组电参数，需要对这些结果进行分析。分析包括工艺效果分析、加工成本、性能价格比的分析。其中，工艺效果分析有切割速度、表面粗糙度、单边放电间隙的分析；加工成本分析有材料成本和加工



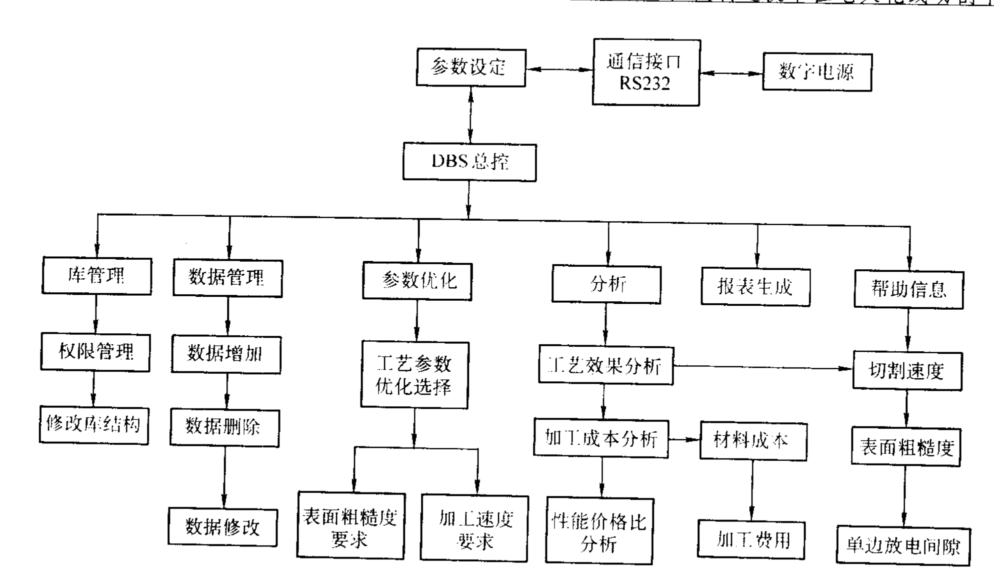


图3.6-29　高速走丝线切割加工工艺数据库系统DBS框架图

费用的分析。用户选定分析标准，系统依此标准对电参数组进行最优排序，给出推荐方案，以表格或图表形式给出分析结果。

4）其他要求　报表生成模块可输出查询或分析结果，系统还提供帮助功能，并具有容错能力。

4　电火花线切割智能加工系统

4.1　智能制造技术概述

21世纪是未来消费者导向的时代，制造业如何对市场环境急剧变化作出快速反应，及时掌握用户需求，有效地生产和提供令用户满意的产品和服务，是21世纪制造业面临的挑战。传统的设计和研究方法已不能有效地解决现代制造系统中所出现的问题，这就促使我们借助现代的工具和方法，利用各学科最新研究成果，通过集成传统制造技术、计算机技术以及人工智能等技术，发展一种新型的制造技术与系统，这便是智能制造技术（Intelligent Manufacturing Technology，IMT）与智能制造系统（Intelligent Manufacturing System，IMS）。

人工智能（Artificial Intelligence，AI）是当前科学技术中的一门前沿学科，它是一门研究如何构造智能机器（智能计算机）或智能系统，使它能够模拟、延伸、扩展人类智能的学科。人工智能的研究范畴不只局限于计算机科学和技术，同时也涉及心理学、认知科学、思维科学、信息科学和系统科学等多种学科。总体来说，人工智能分为两大类：一类是符号智能，一类是计算智能。符号智能是以知识为基础，通过推理进行问题求解。计算智能是以数据为基础，通过训练建立联系，进行问题求解，包括人工神经网络、遗传算法、模糊系统等。其中人工神经网络具有分布、并行、自组织、自学习等特性，为人们在利用机器加工处理信息方面提供了一种全新的方法和途径。

智能制造的核心含义是指用计算机实现机器智能来代替或延伸制造环境中人的部分智能，以减轻人类制造专家部分繁重的脑力劳动负担，并提高制造系统的柔性、精度和效率。如果将体现在制造系统各环节中智能加工技术与制造环境中的人的智能以柔性方式集成起来，并贯穿于制造过程中，这就是智能制造系统。因此，智能制造系统是一个以高度集成化、信息化、柔性化、精密化为特征的高度自动化的制造系统。

4.2　电火花线切割智能加工系统

电火花线切割加工是一种高度自动化的重要的非传统加工方法，与其他机床相比，电火花线切割机床操作难度大，加工中的影响因素较多，同时由于电火花线切割加工时间长，一般电火花线切割机床都要求昼夜加工，无人化操作的要求也非常强烈。因此如何实现高度自动化一直是电火花线切割加工技术研究中的一个重要问题。利用当今计算机技术，数控技术，柔性化、高速化和当今机械制造技术精密化的特点，对线切割加工实现自动化，发展高精度、高表面质量和高效率的线切割机床，开发线切割加工的智能化系统，将成为新一代电火花线切割机床的一个必然趋势。

（1）电火花线切割智能加工系统结构

一个完整的电火花线切割智能加工系统的功能应该能较大程度地覆盖电火花线切割的加工工艺过程，同时系统各功能模块应高效地集成来提高电火花线切割加工过程的自动化水平。电火花线切割的加工工艺过程可分为加工前的工艺设定（离线）和加工过程中的实时控制（在线）两大部分。相应地，电火花线切割智能加工系统也主要由离线智能工艺系统和在线智能控制系统两个子系统组成，如图3.6-30所示。整个智能加工系统建立在开放式数控系统的硬件平台上，由多个功能模块组成，各功能模块之间既有一定的独立性，又一定程度上相互依赖，数据流在不同的功能模块间传递，并以人工智能技术为核心。智能加工系统通过具有开放式结构的数控系统硬件平台来集成各功能模块。

1）离线智能工艺系统　离线智能工艺系统的主要功能是电火花线切割的工艺参数的优选以及数控编程。其中根据加工条件和加工要求推荐最优电源参数，并给出相应的工艺效果预测是离线智能工艺系统的主要功能。当系统所预测的工艺指标满足加工要求时，电火花线切割智能加工系统将会自动选定机床工艺参数，并进入加工阶段。离线智能工艺子系统功能模块如下。

① 工艺数据库　工艺数据库保存的是大量的通过试验获得的电火花线切割机床的工艺参数与工艺指标之间的数据，通常以表的形式存在，是实现工艺参数优选和工艺指标预测的物质基础。工艺数据库应具有添加、删除、修改、备份等数据维护与管理的基本功能。

② 工艺知识库　反映电火花线切割机床加工性能的知识隐含在工艺数据库中的试验数据中，如何从已有的工艺数据中获取反映电火花线切割机床加工性能的知识，并通过这



些知识来优选和预测工艺指标是工艺知识库的主要任务。工艺知识库的管理包括知识编辑、知识更新、知识的检查等功能。用神经网络来建立反映工艺指标与工艺参数之间强非线性的知识系统能很好地反映电火花线切割机床的加工性能，并具有不断学习、不断进化的优点。离线智能工艺系统可根据工艺数据库中的知识自动进行推理（优化算法）以获得满足加工要求的最优工艺参数。

③ 自动化编程系统　在操作者完成工件几何图形的交互式输入后，自动生成电火花线切割加工所需的数控文件（如 ISO 代码）；该系统还应能够通过标准的数据接口接受其他 CAD 系统提供的加工零件的图形文件（如 DWG 文件），使离线智能工艺系统具有良好的开放性。

④ 接口部分　实现离线智能工艺系统与在线智能控制系统的数据通信。接口部分将根据加工要求由工艺知识库优化推理获得的最优加工参数以及数控自动编程的信息传输给在线智能控制系统，改变以往由手工操作的局面，提高了电火花线切割机床的自动化水平。

2）在线智能控制系统　在线智能控制系统是电火花线切割智能加工系统的核心部分，也是体现机器智能的重要部分。在线智能控制系统将自动感知加工过程，从而分析和推理求解的问题，生成相应的解决策略信息，以此来指导和控制加工过程，使机床加工系统能模仿熟练操作者进行生产，实现无人干预的而又在最优状态下加工，以减轻机床操作人员繁重的工作负担，并大大地提高电火花线切割加工系统的效率和加工精度。

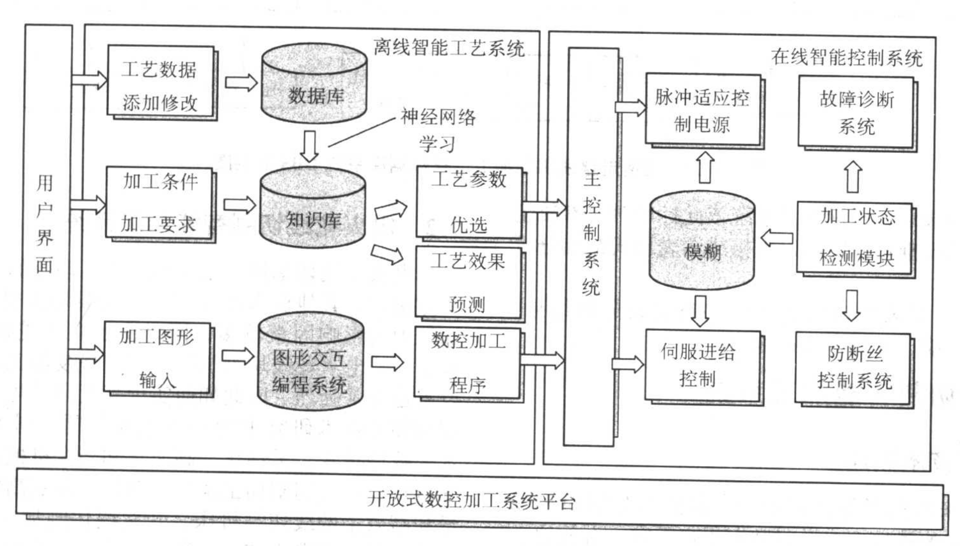


图 3.6-30　电火花线切割智能加工系统的框架结构

电火花线切割在线智能控制系统首先要实现对加工过程的准确检测，在此基础上，根据检测环节获得的加工过程中状态变化信息，由机床加工控制系统对伺服进给系统和脉冲电源参数进行实时控制；当加工过程中出现故障时，智能控制系统能分析原因，给出相应的提示信息。在该子系统中，有如下重要的功能模块。

① 加工状态检测　该模块是电火花线切割在线智能控制系统的一个关键环节，也是一个基础性环节。在电火花线切割加工中，没有对加工过程的准确检测，是无法实现对加工过程进行有效控制的。电火花线切割加工状态检测研究必须解决两个问题：对电火花线切割加工中放电间隙的状态必须能准确地识别；必须构造合理的变量来反映加工状态，该变量要能很好地反映加工过程中的恶化及放电间隙状态的变化。由该模块获得的反映加工状态的信息将实时地传输给后续的加工控制模块以实现智能化加工。

② 电源参数控制　电火花线切割加工中，可在线控制的电源参数主要有脉冲间隔、峰值电流和脉冲宽度。电源参数的实时控制将能改变向放电间隙输入的能量，当放电加工处于良好状态时，应适当控制电参数，增加输入的能量，提高切割速度；当放电加工处于不良状态，应立即减少向放电间隙输入的能量，避免加工过程的进一步恶化。由于电源参数控制的响应速度快（毫秒级），成为快速改变电火花线切割加工过程状态的重要手段，特别是为防断丝现象提供有力的保证。该功能模块需根据一定的控制算法，实时控制电源参数。

③ 伺服进给控制　放电加工的本质是维持合理的放电间隙大小，使脉冲电源产生的脉冲高效地被利用。电火花线切割伺服智能控制系统将在放电间隙大小的准确检测基础上，根据模糊推理机中的控制规则，实时控制伺服机构进给量，使加工保持最佳的放电间隙，实现高效、稳定的加工。

④ 模糊推理机　该模块是在线智能控制系统的核心部分，是体现机器智能的重要组成环节。模糊推理机将能根据加工检测模块传输的信息进行分析以及根据模糊控制规则进行推理，生成相应的控制信息，以此来控制加工过程，从而使电火花线切割智能加工系统能自动模仿熟练操作者，实现无人干预的而又在最优状态下的加工。该模块将提供伺服进给的控制规则。

⑤ 故障诊断系统　该系统是在电火花线切割加工机床发生故障时，能自动检测机床的各个关键部件并可及时报警。该系统可对检测的信息进行分析，给出相应的故障原因提示，为排除机床故障提供有力的在线帮助，降低机床的操作难度。

在电火花线切割在线智能控制系统中，加工状态的检测和控制规则库中的控制算法是两个关键性环节。在电火花线切割加工中，只有对放电间隙状态的准确检测，才能对加工过程进行有效的控制；在加工状态检测基础上，模糊推理机中的控制算法才能有效实现。只有放电间隙状态进行准确检测和合理有效的控制算法两者相结合，才能实现真正意义上电火花线切割高速、高质量的加工过程。

（2）电火花线切割智能加工系统的工作流程

电火花线切割智能加工系统的工作流程顺序为：

1）启动机床；

2）操作人员用绘图软件绘制工件图形；

3）编程系统自动生成数控加工程序；



4）输入加工条件和加工要求；

5）智能加工系统根据知识库推荐最优的工艺参数，并预测可能获得的工艺效果；

6）如果操作人员满意，则由智能工艺参数系统自动选定脉冲电源参数和伺服进给系统初值；

7）进入加工阶段，检测模块对放电间隙状态不断地检测；

8）系统根据控制规则库来调节电源参数和伺服进给量使放电加工处于最佳状态；

9）当机床发生故障时，由故障诊断系统报警并给出相应的提示信息；

10）加工结束，检验工件。

（3）电火花线切割智能加工系统的关键技术

在电火花线切割智能加工系统研究中，主要应该解决以下的关键技术。

1）加工过程建模　在电火花线切割离线智能工艺系统中，建立离线工艺知识库是一个重要环节，也是体现离线工艺智能化的重要方面。工艺系统中的知识是对机床加工性能的抽象化，如何获取知识成为建立工艺知识库的关键问题，这里的知识是指有关机床的加工参数与其相对应的加工指标的知识。因此，如何建立反映加工参数与工艺指标之间关系的模型成为获取知识的重要手段。该模型要能精确地反映机床的加工性能，为根据加工要求选定最优加工参数和不断预测机床加工工艺指标提供可靠的基础。加工过程建模实际上是一个非线性多元函数求解问题，求解的精度直接影响工艺参数的优选和加工过程的工艺指标预测精度。

国内外的研究表明，可应用非线性多元回归技术和多层前向BP神经网络技术来建立加工参数与工艺指标之间关系的模型；对比两种模型对实验数据的拟合精度和建模的难度指出，多层前向BP神经网络更适合于电火花线切割加工过程的建模。

2）电源参数优选算法　电火花线切割加工中，工艺指标之间存在一定的矛盾。目前主要研究的工艺指标有加工速度和表面粗糙度，这两个工艺指标在一定程度上是相互矛盾的。在确定的加工条件下，为获得高的加工速度，可增大向放电间隙输入的能量，但工件的表面粗糙度等级就会降低；要使工件表面获得高的表面粗糙度等级，单个放电脉冲的能量势必要降低，但这将使加工速度降低。模拟退火算法和穷举法可以用来解决电火花线切割优选加工参数的问题。由于目前电火花线切割机床工艺参数是分挡的，穷举算法是更简单和更有效的优选算法。

3）加工状态检测　加工状态的准确检测是电火花线切割在线智能控制系统中的关键性环节，也是一项基础研究，没有对加工状态的准确检测，无从谈起有效控制加工过程。在电火花线切割加工过程中，放电间隙的状态一般有三种典型状态：正常放电状态、短路状态和开路状态，这三种放电间隙状态与工艺指标之间具有非常密切的关系，因此，放电间隙状态识别成为电火花线切割加工过程检测的首要环节。加工检测还要对加工过程状态进行判定，为后续的智能控制系统提供信息。

4）断丝先兆及控制　断丝是电火花线切割加工中特有的现象，它不仅明显降低加工速度，增加加工成本，而且对机床操作人员的心理有较大的影响，使机床加工性能在实际加工中难以真正发挥，同时它也是电火花线切割无人化加工最大的障碍。

5）伺服进给智能控制　由于电火花线切割伺服控制过程具有高度的非线性，且放电间隙的变化特性尚未掌握，建立在传统控制理论上的控制模型难以对加工过程进行满意的控制，伺服进给控制一直是电火花线切割加工控制研究的难点。模糊控制方法已在各种加工方法中得到了成功的应用。因此，可以利用模糊控制理论来建立电火花线切割的伺服控制模型。

和传统控制方法相比，模糊控制具有很多优点：①模糊控制系统无需对被控对象进行精确的数学建模，而是根据经验规则直接建立控制模型；②系统知识库是基于对控制对象的定性认识和经验规则来建立的，而控制是直接通过运用语法规则进行模糊推理来进行的；③模糊控制系统是非线性系统，具有很强的鲁棒性，尤其适应于非确定性和非线性系统。

（4）电火花线切割智能加工系统的的特点

基于人工智能技术的电火花线切割智能加工系统可采用人工神经网络技术和模糊控制技术作为加工智能化的基础，并以开放式数控系统作为集成平台，该智能加工系统将具有以下三个重要特点。

1）智能化　智能化是电火花线切割加工智能系统的一个主要特点。系统的智能一方面体现在对工艺知识的自学习、自组织以及对知识的表达能力上；另一方面，系统的智能体现在系统可以根据加工状态检测模块所提供的信息，模仿有经验的机床操作者来对加工过程进行分析，并推理获得所需的控制信息，以此来指导和控制加工过程，减少了对机床操作者经验的要求，提高机床的加工效率，最大程度地发挥机床的潜力。

2）知识化　电火花线切割智能加工系统事实上是一个基于知识的智能系统。离线的电参数优化是建立在工艺知识库的基础上；在线的模糊逻辑推理是依据模糊推理机中的知识。知识是智能加工系统的基础，知识的准确性以及知识的多少将会直接影响电火花线切割智能加工系统的性能。电火花线切割智能加工系统中的知识可分为直接知识和间接知识两大类。直接知识是指机床长期使用中积累的经验和技能；间接知识是指电火花线切割加工过程中蕴涵的知识，它是一种隐性知识，如何获取这一类知识曾经困惑过电加工线切割研究人员，而这类知识在提高机床的智能化水平，降低人工操作机床难度方面具有重要的作用。BP神经网络模型适合于处理非线性映射的问题，具有良好的推广能力，电火花线切割工艺参数优化及工艺效果预测正是在神经网络表达的大量知识基础上来实现的。有关电火花线切割加工过程的知识是需要不断积累和通过研究来提取的。

3）开放性　开放性是电火花线切割智能加工系统的重要特点。电火花线切割机床智能加工系统的开放性将为电火花线切割机床在网络技术的支持下以一定的策略集成到智能制造系统中，使之成为未来制造系统的一员提供有力保证。系统的开放性体现在以下三个方面。

① 工艺知识的可管理性　工艺数据库中数据要不断地更新，一些不再适用的数据将会删除或更改，新的数据将会增加，因此在工艺数据基础上建立的工艺知识将会更新；另一方面，在构建系统时不可能把全部知识收集起来，知识需要日积月累地形成，此外，机床应用中会出现一些新工艺，带来了新知识。对知识的更新有的要求人工进行，有的可自动进行，但这些都需要一个开放的工艺知识库，一个能对知识进行增删、修改的知识库是非常必要的。

② 模块集成的开放性　整个电火花线切割智能加工系统是在统一的平台用多个功能模块来集成的。集成方式可采用基于开放式体系结构平台用标准接口或用公共界面将软硬件功能模块集成在一起。不同的模块提供的功能不同，模块之间的通讯可通过专用数据文件来传输。智能加工系统可添加新模块来增加新功能，也可以对模块升级，以符合新标准。模块化集成系统结构适合于规模中等的系统设计，优点在于结构清晰，信息流动明了，易于设计。电火花线切割智

能加工系统应是在功能层次上的集成来实现的。

③ 控制系统的开放性　数控系统技术发展的重要方向是开放式结构数控系统。开放式结构数控系统的优点在于具有广泛的兼容性，机床控制系统不再像传统的控制系统是封闭的，而是一个开放的可以人机交互的系统。机床的研制者可在较大的范围内根据需要配置硬件，并充分利用目前日益成熟的网络技术，以及与其他的远程制造设备相连，操作人员可以在远端在线查询机床的工作情况，并根据加工情况进行预测，而且可以和远端的知识专家进行沟通，传递信息。同时在此结构下，也可方便地扩充数控系统的功能；此外，系统能直接运行第三方的软件，如与远端的电火花线切割控制系统共享 CAD/CAE/CAM 资源等，能充分利用现有的软件来开发出所需的数控系统。

开放式数控系统最新的动向是建立在 PC 上的数控系统。用 PC 来建立电火花线切割智能加工系统必须对该系统软、硬件结构有明确的设计原则，并以此来指导整个智能加工系统的构建。

在硬件结构上，采用 PC 的主板加插卡式结构来实现电火花线切割的数控及智能加工功能。具体实现是在通用 PC 的总线扩展槽中插入多个专用的功能卡，功能卡可用来实现加工轨迹生成、加工状态检测、电源参数控制、伺服进给控制等功能。一块功能卡就是一个功能相对独立的模块，功能模块通过系统的开放式总线与 PC 集成，每个模块都有独立的微处理器来进行数据处理，不占用 PC 主机的资源，因此，整个加工系统是一个主从式的多处理器结构的开放式系统。该系统硬件结构的优点是能充分保证系统高速运行和高稳定性；同时，系统具有良好的开放性，可以添加新模块来实现新的功能，也可以对原有功能模块进行升级，而无需对整个系统进行修改。基于 PC 的电火花线切割数控加工系统可以通过开发以智能技术为核心的功能模块来实现数控系统的智能化加工，且模块智能可不断提高，以使整个系统向更深层次的智能化发展。

在软件结构上，一方面，PC 的开发环境非常有利于复杂的控制界面的设计与开发，可安排 PC 来实现人机交互集成界面；另一方面，PC 的微处理器具有强大的计算能力，可安排将大量的信息预处理工作放在 PC 上进行。对于直接的控制任务及必须与控制同时进行的信息处理（如插补、状态检测、电参数控制和伺服控制等）可放在功能卡上，以满足实时控制的要求。整个软件系统将由主机软件系统与模块软件系统组成，智能化功能将主要通过软件系统来实现。

4.3　电火花线切割智能加工系统主要模块

（1）电火花线切割放电间隙状态识别

1）放电间隙状态分类　在电火花线切割智能加工控制系统中，对加工状态的准确检测是进行伺服进给控制和脉冲电源参数控制的重要依据。对电火花线切割加工状态进行准确检测首先必须实现对放电间隙状态的识别。放电间隙状态的识别一直是电火花加工控制研究中的一个重要问题，目前得到广泛认可的电火花加工放电间隙状态的分类是根据放电间隙的脉冲电压和电流信号的波形特性，将放电间隙状态分为四种类型：开路状态、短路状态、正常放电状态和异常放电状态（不稳定电弧和稳定电弧），如图 3.6-31。

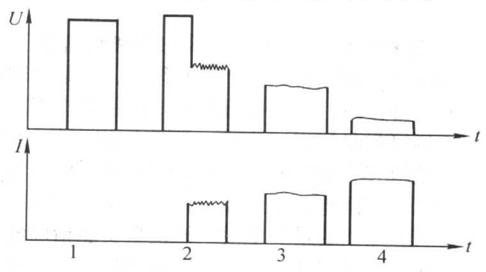


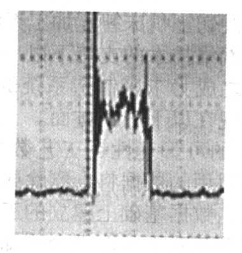
图 3.6-31　电火花加工四种放电间隙状态的电压和电流特性

1—开路状态；2—正常放电状态；3—异常放电状态；4—短路状态

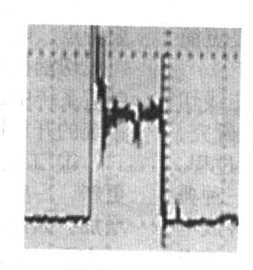
① 开路状态　开路为间隙未被击穿时的脉冲状态，此时间隙的电压很大而只有微弱电流通过间隙。一般当工件与工具之间的间隙过大或电极自动抬刀时，会出现开路状态。过多的开路脉冲会降低加工的效率。

② 正常放电状态　此时的脉冲在保持放电期间电压为放电维持电压且有高频分量，同时伴有较强的射频发射和声发射，其击穿延时随机发生。正常放电形成的放电凹坑的直径大，深径比小，加工表面质量好且加工效率高。

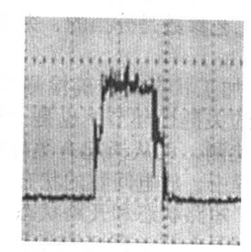
③ 异常放电状态　此类包括可恢复性不稳定电弧和不可恢复烧伤性稳定电弧。前者放电维持电压波形较平滑，高频分量幅度不大，且放电维持电压低于正常火花放电电压。它可以自行恢复为正常放电或通过伺服控制恢复为正常放



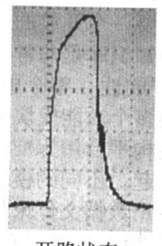
正常放电状态 1



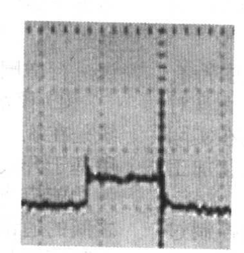
正常放电状态 2



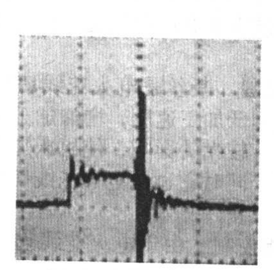
正常放电状态 3



开路状态



短路状态 1



短路状态 2

图 3.6-32　电火花线切割放电电压波形图



电，持续的结果是形成不可恢复烧伤性稳定电弧，其电压和电流的波形都很光滑，电压较低。稳定电弧的蚀除量很小，放电点仅为熔融，在工具和工件表面都会形成难以去掉的烧伤黑斑，严重影响加工质量。

④ 短路状态　此类电压很低，接近于零。电流很大，而且波形光滑。在放电加工中，短路消耗电能但无加工作用，大量的短路表明放电间隙过小，加工不稳定。

这四种类型的放电间隙状态分别对应截然不同的加工性能。研究放电加工间隙的电信号特性对识别加工间隙中状态是具有重要意义。电火花线切割加工与电火花成形加工的放电间隙状态是有区别的，电火花线切割放电间隙状态识别的研究中，简单地套用电火花成形加工的检测方法是不可行的。

2）放电间隙电压特性　由于电极丝运丝速度高（约10 m/s），高速走丝电火花线切割加工放电间隙的脉冲电压形态有自己的特性，间隙脉冲状态主要为三种状态：开路状态、正常放电状态和短路状态，如图3.6-32所示。稳定电弧状态出现的概率非常小。

3）放电间隙电压理论分析　三种放电脉冲状态的间隙电压是不同的，如果能设置合理的电压阈值，则根据放电间隙电压进行逻辑判断可方便、准确地实现对脉冲状态的识别。图3.6-34是高速走丝电火花线切割加工区（图3.6-33所示）的等效电路原理图。

在电火花线切割加工中，两个电极间的电压（图3.6-34中C、D两点电压值）是无法直接检测的，实际检测的间隙电压为进电块和工件之间的电压（图3.6-34中A、D两点的电压值，以下简称为间隙电压）。

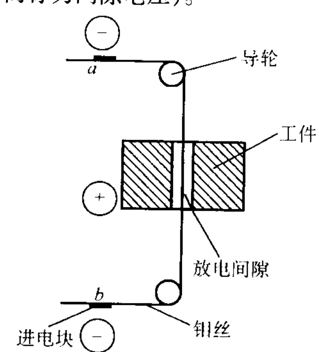


图3.6-33　高速走丝电火花线切割加工原理图

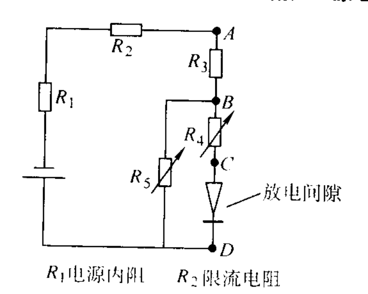


图3.6-34　等效电路图

在图3.6-34中，R_3为进电块到工件的表面的钼丝等效电阻，当丝架高度、钼丝丝径及工件厚度确定后，在加工中保持不变；R_4为工件表面到放电间隙内的放电点（短路点）钼丝等效电阻；R_5为放电间隙内工作液所产生的分布等效电阻；在加工中，R_4和R_5的大小受到放电间隙中瞬时放电点或短路点位置、被加工工件厚度以及极间介电性能的影响而发生变化。从等效电路图可知，放电间隙检测到的电压并非真正的极间放电电压$N_{极}$：

$$u_{AD(正常放电)} = u_{极} + i(R_3 + R_4) \tag{3.6-8}$$

$$u_{AD(开路)} = i(R_3 + R_5) \tag{3.6-9}$$

$$u_{AD(短路)} = i\left(R_3 + \frac{R_4 \times R_5}{R_4 + R_5}\right) \tag{3.6-10}$$

在上式中，$u_{极}$代表正常放电状态时两电极间的放电电压，此时的电极间电压大小仅与电极对材料及工作液性质有关，而电源参数和极间距离对其几乎没有影响。对于检测正常放电状态的间隙电压，由忽略R_5的式（3.6-8）知其值受到脉冲电源和钼丝阻抗的影响。由式（3.6-9）和式（3.6-10）可知，开路状态和短路状态受到瞬间峰值电流的影响明显；但在开路状态时，由于瞬间电流较小（工作液的弱导电性产生的漏电流），因此开路状态下的间隙电压明显高于其他状态。因此，对于分析正常放电状态和短路状态时的间隙电压，由于表达式中R_4和R_5的大小不仅与工件厚度及切割方向有关，而且与放电点的位置有关，而在加工中放电点位置是随机变化的，这使得理论分析R_4和R_5对放电间隙检测电压的影响变得十分困难。

在高速走丝电火花线切割加工中，放电间隙电压与放电间隙的脉冲状态之间是密切相关的，间隙电压成为高速走丝电火花线切割放电间隙状态识别的重要参数。与此同时，由于高速走丝线切割的电极丝是高速往复运动以及加工中放电间隙击穿的影响源较多，使得电火花线切割放电间隙状态与电火花成形的放电状态有较大的区别，表现为：

① 加工中的高频分量出现的情况相当复杂，如不能对高频分量的特征频率进行准确定量的研究，会导致高频检测电路难以识别正常放电状态和短路状态；

② 峰值电流对于正常放电状态和短路状态的电压的影响是显著的，且放电间隙的电压量随峰值电流增加而呈单值增加。

（2）电火花线切割加工状态检测

电火花线切割智能加工控制系统是电火花线切割智能加工技术的核心，而电火花线切割加工状态的检测是电火花线切割智能加工控制系统的关键问题。在电火花线切割加工中，放电过程本身有较强的随机性；此外，电极丝本身的振动以及在加工间隙中的走丝运动，使得加工间隙中的放电状态变化更为复杂。目前针对高速走丝电火花线切割还没有开发一个完整的电火花线切割加工状态检测系统用于实践中。由于加工状态检测环节没有很好的解决，高速走丝电火花线切割加工的脉冲电源和伺服进给系统一直是简单的开环系统，机床的加工性能始终没有明显的提高。传统的进给控制采样电路只是对放电间隙中电压进行滤波平滑，获得一个反映间隙大小的平均电压量，且该量只为伺服进给控制系统提供信息。对于伺服控制系统，这种方法的缺点在于对间隙状态检测不够准确。由于放电间隙的开路电压远高于放电加工电压，而短路电压则较接近于放电加工电压，使伺服控制系统对开路状态敏感，而对正常放电和短路放电状态响应慢，难以准确地进给跟踪，导致加工稳定性差。

电火花加工是一个相当复杂的物理化学过程，它伴随着各种声、光、电、磁信号的产生。在放电加工中，反映加工状态的可检测的信号主要有放电间隙的电压信号和电流信号，以及脉冲放电时存在的射频发射和声发射信号。根据采集信号和不同的检测目的，提出了多种电火花加工状态检测方法。这里介绍其中几种重要的检测方法。

1）火花放电频率检测法　电火花线切割加工中，对于等能量脉冲电源，正常放电脉冲频率和异常放电脉冲频率（分别指单位时间内的正常放电脉冲和异常放电脉冲的个数）与加工状态的关系密切，成为重要的研究对象，已有文献针对低速走丝电火花线切割的等能量脉冲电源研制了火花放电频率检测系统。这种检测系统对放电间隙电压信号进行采

集，在研究等能量脉冲电源的正常放电脉冲和电弧脉冲典型电压波形的基础上，采用硬件对间隙状态进行识别。由于短路状态和电弧状态从电压上难以区别，这类检测系统将短路状态和电弧状态归为一类。这种检测方法特点是，加工中能连续记录多个采样时间内的正常放电脉冲和异常放电脉冲的次数，从而获得加工中正常放电和异常放电的频率值，通过分析研究不同加工状态下的多个采样时间的正常放电和异常放电频率值波动情况来研究加工稳定性。目前这种检测方法多用在检测低速走丝电火花线切割断丝问题的研究上。

2）射频信号检测法　英国伯明翰大学的 S.K.Bhattacharyya 等研究人员对放电加工中的射频信号进行了深入研究。研究表明，在放电加工时，脉冲正常放电存在的大量射频发射和声发射信号，其频率在 1 MHz 以上并有自己的特征频率；而间隙放电处于非正常放电时，射频发射和声发射信号的频率相当弱；当间隙放电处于开路和短路状态时，射频发射和声发射信号为零。因此为能区别出正常放电和异常放电，特别是检测出不稳定放电电弧状态，出现了对间隙电压射频信号进行采集来检测加工状态的方法。此外，正常放电的谱分析表明当放电脉冲的频率变化时，放电中的射频信号不会发生改变；当加工处于最优状态时，射频信号的强度也最强。研究也表明，射频信号的强度与金属的蚀除率成正比，因此检测射频信号可以用来对加工的效率进行在线检测。图 3.6-35 为一种典型射频信号检测图。

上海交通大学的研究人员曾在不同加工条件下，对放电加工过程的射频信号进行了深入的研究，指出即使加工参数、工作液、电极对材料等因素相同，不同规格和类型的电火花加工机床工作时，强度特大的射频信号会出现在不同的频段，即存在“特征频段”，对该频段的准确识别将有助于提高对加工过程状态的在线检测精度，他们还开发了十通道的电火花加工射频辐射检测仪，用来遥测多台同时工作的电火花成形加工机和电火花线切割加工机的加工状态，试验取得了较好的检测效果。

3）其他检测方法　K.K.Hon 和 E.S.Razavi 进行了大量的实验研究，发现在许多放电过程中伴随着高频信号的产生，同时发现放电延时信号（t_d）能够在相当程度上反映间隙放电的过程，因为击穿延时长意味着消电离充分，极间介电性能已恢复，并认为有击穿延时 t_d 为正常放电，没有击穿延时为电弧放电，并通过在线检测放电间隙电压幅值来鉴别放电状态。Fowell、Shaw 和 Crookall 通过检测放电间隙电压某一频段（音频至 7 MHz）来输出脉冲效率。美国密西根大学的 S.M.Pandit 和 K.P.Rajurkar 等研究人员用一种称为 DDS（Data-dependent System）的检测系统对放电间隙电压和电流信号进行采集，运用动态分析的方法建立了加工间隙状态的模型，用来对加工过程实时控制。我国台湾地区的 Y.S.Tarng，Y.Y.Chu 和 M.T.Yan 等研究人员提出用模糊识别的方法对放电加工状态进行鉴别。

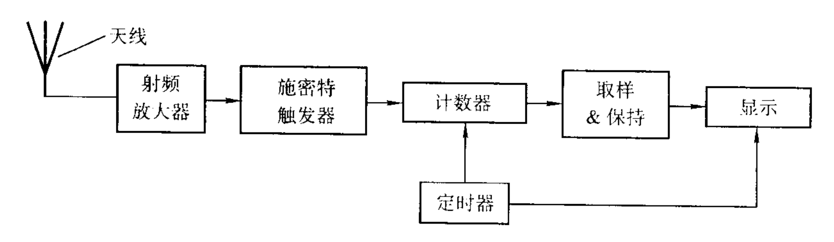


图 3.6-35　射频信号检测法示意图

4）电火花线切割加工状态检测的目的　电火花线切割加工状态检测的目的是及时有效地检测到放电加工状态的恶化以及对伺服进给状态的识别，既能判断当前的极间间隙是否维持在最佳距离，同时判断出当前的伺服状态是处于“欠跟踪”还是处于“过跟踪”状态，从而为电火花线切割脉冲电源和伺服进给系统的智能控制提供可靠的信息。目前电火花线切割放电间隙状态检测方法多是直接借用电火花成形加工的检测方法。高速走丝电火花线切割加工中的放电间隙状态与电火花成形加工有较大的区别，高速走丝电火花线切割放电电压波形具有以下的特点。

① 放电间隙状态在同一脉冲宽度内，可以出现多种形式的状态转换：开路转换为正常放电状态；开路状态直接转换为短路状态；正常放电状态转换为短路状态；短路转换为正常放电状态。

② 高速走丝电火花线切割加工中的击穿延时与击穿后的放电间隙状态无关。既可以在一个较长的开路延时后，也可以直接变成短路状态，而一个完全正常的火花放电也可能没有击穿延时状态。

高速走丝电火花线切割加工状态的检测研究中，既要实现对放电间隙状态的准确识别，同时检测系统采集的数据又要能正确地反映加工中的恶化现象及放电间隙大小的维持状态。由于高速走丝电火花线切割加工的系统结构和电极材料都有别于电火花成形加工，它的放电间隙状态也有其特殊性，因此，直接采用电火花成形加工中的检测方法来进行加工状态的检测是难以有效的。高速走丝电火花线切割加工状态的检测研究必须解决两个问题：①对放电间隙状态必须能准确地识别；②必须构造合理的变量来反映加工状态，该变量要能反映加工状态的恶化及正常放电间隙的状态。

① 相对时间比率检测法　在电火花线切割加工中，加工电源的脉冲频率较高，一般为 2～100kHz，且放电加工过程本身具有较强的随机性，只对单个脉冲或几个放电脉冲的状态进行辨别是难以对电火花线切割加工状态进行准确判定的。上海交通大学伍俊等提出了一种可行的“相对时间比率检测法”，计算一个采样周期内的三种间隙状态（开路状态、正常放电状态和短路状态）的相对时间比率值，避免了由于放电过程的随机性而引起的对当前加工过程的误判断。计算如下：

$$\varphi_{op}=\frac{T_{op}}{T_{op}+T_e+T_s}100\% \tag{3.6-11}$$

$$\varphi_{e}=\frac{T_{e}}{T_{op}+T_e+T_s}100\% \tag{3.6-12}$$

$$\varphi_{s}=\frac{T_{s}}{T_{op}+T_e+T_s}100\% \tag{3.6-13}$$

式中，T_{op}为单个采样周期内的开路状态时间（包括放电延时时间）；T_e 为单个采样周期内的正常放电状态时间；T_s 为单个采样周期内的短路状态时间；φ_{op} 为单个采样周期的开路状态相对时间比率，以下简称开路比率；φ_e 为单个采样周期的正常放电状态相对时间比率，以下简称正常放电比率；φ_s 为单个采样周期的短路状态相对时间比率，以下简称短路比率。

用相对时间比率法对高速走丝电火花线切割加工过程进行检测时，在一个采样周期中将获得三个量：正常放电比

率、开路比率和短路比率。当连续地对加工过程检测一段时间，则将获得三组数据，分别是由多个采样周期的正常放电比率、开路比率和短路比率构成的三个相对时间比率序列，其表达形式如下：

开路时间比率序列：$\{\phi_{op}^{i} \mid i = 1, 2, 3, 4 \cdots n\}$

正常放电时间比率序列：$\{\phi_{e}^{i} \mid i = 1, 2, 3, 4 \cdots n\}$

短路时间比率序列：$\{\phi_{s}^{i} \mid i = 1, 2, 3, 4 \cdots n\}$

上式中，n 为采样周期的次数。

② 基于数字电路的检测原理　图 3.6-36 为基于数字电路的电火花线切割加工状态检测系统的结构原理图。

(3) 电火花线切割断丝先兆及控制研究

在电火花线切割加工中，断丝问题一直受到高度重视，是电火花线切割加工研究中的一个热点。断丝现象的预报和控制是在线智能控制系统的一个重要模块。它要求智能控制系统的检测模块能正确地分析电火花线切割加工过程间隙状态的变化，并进行及时有效的控制以避免断丝的发生，这些都必须建立在对断丝现象的规律有深入研究的基础上。

1) 断丝热传导分析　一般认为，断丝的主要原因有如下三点。

① 电极丝温度过高达到再结晶温度时使电极丝拉伸强度下降，丝被拉断。

② 火花放电集中产生的高温使电极丝熔断。

③ 放电集中产生的熔坑使电极丝某点截面积减小而被拉断。

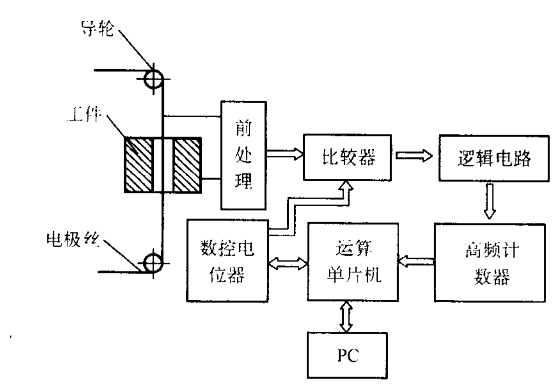


图 3.6-36　基于数字电路的电火花线切割检测系统的结构原理图

因此，运用热传导理论来研究加工中电极丝温度分布以及工艺参数对电极丝温度的影响成为研究断丝机理的主要途径。比利时鲁文大学的 M.Jennes、R.Snoeys 和 W.Dekeyser 建立了电极丝热传导模型，模型中假设放电是圆形表面热源，在有限柱体内产生热并呈随机分布，将焦耳热作为第二个热源，研究中用解析法和有限差分法计算了电极丝的静态温度分布以及持续放电的温度分布（考虑脉冲间隔），前者计算的电极丝最大温度为 150℃，后者的电极丝最大温度为 650℃，但是在放电持续 1 s 的条件下，这与实际加工是有差异的。此后，S.Banerjee 对 M.Jennes 的模型进行了修正和简化，新模型考虑了脉冲放电持续时间以及放电通道宽度方向上的热能扩散，研究中用有限差分法计算了单脉冲内放电通道附近丝移动的三维瞬间电极丝温度分布，计算结果与试验比较接近。美国内布拉斯加林肯大学 K.P.Rajurkar 等也从热传导方面对电极丝温度分布进行了研究。他们通过对电流和电压的检测估算得到了电极丝上的温度分布，结果显示电极丝的平均温度大约为 100℃，有时甚至更低，所获得的热传导计算结果与实际加工结果相差较大，只能是定性或粗定量地反映电极丝上的温度分布和蚀除速度。这是因为放电能量在电极丝上的分配没有确切的数据，放电通道半径尚未找到精确的计算公式。他们还研究了冷处理后的电极丝与加工性能之间的关系，使用在 77 K 的低温中存放 24 h 后的电极丝进行切割，试验表明，断丝的可能性降低了 30%。

从热传导理论出发研究的工艺参数及其他物理参数与断丝现象之间的关系还不很明了，对电极丝温度的预测与实际情况有较大差别。

2) 断丝先兆分析　早在 20 世纪 70 年代末，Tanimura 和 Heuvelman 对弛张式脉冲电源低速走丝线切割机床的断丝现象进行了研究，他们发现在断丝前 30 ms 或更长一点时间，短路的频率会非常高；在 80 年代初，日本东京大学的 N.Kinoshita 和 M.Fukui 也发现在低速走丝线切割加工断丝前 5～40 ms，火花放电频率会突然增加。比利时鲁文大学的 R.Snoeys 认为在等频率脉冲放电条件下，对低速走丝线切割加工中的电极丝热负载的估计可以通过对间隙消耗功率的计算来获得，研究表明，断丝前的消耗功率总是远远大于平均消耗功率，他提出对瞬时消耗功率进行监控，并通过调节脉间和伺服参考电压来控制电极丝上的热负载。美国内布拉斯加林肯大学 K.P.Rajurkar 等用研制的火花放电频率检测仪对低速走丝电火花线切割的断丝现象进行了研究，结果表明断丝前有一个重要先兆：在断丝前火花放电频率（指单位时间内正常放电脉冲的个数，与高频信号相区别）突然上升，由于火花放电频率过高使电极丝局部温度过高，进而导致断丝，因此必须维持火花放电频率在一个最佳水平上；其最新研究指出，不同厚度工件的最佳火花放电频率不同，必须实现工件厚度的实时检测。为在线识别工件厚度，他们建立一个多输入参数模型，由间隙电压量、伺服进给量和实时检测的火花放电频率来识别，这使得在伺服进给不稳定时也能对厚度识别有很高准确性。他们通过试验建立厚度与最佳火花放电频率关系的公式，当工件厚度识别后，最佳火花放电频率就确定了。在控制火花放电频率来防止断丝的研究上，他们采用了自适应控制理论来建立了一阶控制模型，模型参数采用在线递推辨识以适应放电加工的强随机性，试验表明，该控制策略使在变厚度条件下也能维持最佳的火花放电频率，保持高速切割，同时有效避免断丝发生，该控制策略在电火花线切割加工自适应控制研究中是相当先进的。南京航空航天大学黄因慧对高速采集系统低速走丝电火花线切割加工断丝前后的间隙状态进行了连续的检测，研究指出断丝前两个明显先兆：①火花放电频率的突然增加，增加幅度大约为 20%～50%；②火花放电频率增加之前，加工过程有一段不稳定阶段。他还提出了针对不同先兆的检测方法。中国台湾地区的廖运炫教授等人运用模糊控制技术在电火花线切割防断丝控制方面作了有益的研究。他们在等能量电源的低速走丝电火花线切割机床上，通过对大量的加工脉冲分析获得了与上面接近的结论，此外，他们还发现：火花放电频率的下降，同时电弧频率（指单位时间内电弧脉冲的个数）逐渐上升也是断丝的一个重要先兆；在此基础上，他们对脉冲间隔和进给伺服参考电压采用模糊控制。实验表明，与传统的控制相比，模糊控制技术具有良好的适应能力，控制器可以由放电间隙状态的检测来感知加工条件的变化，从而自动调节控制参数，如同一个熟练的操作人员，试验取得了较满意的效果。黄因慧还和张坚以及哈尔滨工业大学章伟等对高速走丝电火花线切割加工中断丝现象进行了初步研究，指出“不夹杂开路或短路的持续放电脉冲串”是断丝的先兆。

这些研究都说明断丝之前有特定的先兆，且表现为一定规律性。高速走丝电火花线切割断丝发生也具有两个重要先兆。

① 丝筒换向后出现正常放电状态时间比率值的突然上升，且断丝发生在丝筒刚完成换向后的时间内，正常放电状态时间比率值的上升表明在采样周期内正常放电的时间明显增加，出现了正常放电在时间上的集中，导致了断丝发生。

对于高速走丝电火花线切割加工，丝筒的来回换向在加工中是一个干扰，丝筒换向前后，电极丝的张力急剧变化，此时，当高频电源的脉冲电压施加后，加工中将出现不稳定现象，当这种不稳定以正常放电状态在时间上集中的形式表现时，加工过程中将易发生断丝现象。

② 正常放电状态的相对时间比率值出现了明显振荡，且这一现象将持续一定的时间，然后发生断丝现象。正常放电状态相对时间比率值的明显振荡是指在采样周期内，正常放电的时间出现忽大忽小，且大小变化的幅度大。这一现象与稳定加工时正常放电序列的结构特性是不一致的。稳定加工时的正常放电将是十分接近一个平稳随机过程的，正常放电序列只是在序列均值水平上进行非常小的波动，而不应出现明显的振荡。断丝前一段时间内出现正常放电相对时间比率值明显振荡表明：此段时间内，放电间隙状态是在开路和短路状态之间来回变化的，也即此段时间内，伺服进给状态是非常不稳定的，电火花线切割机床的伺服进给控制系统没能有效地将放电间隙维持在一个最佳状态上。因此，当在电源参数能量较大的情况下，加工过程中出现伺服进给的不稳定导致放电间隙状态发生恶化，将是产生这一类断丝现象的重要原因。

3）断丝检测　电火花线切割加工中，放电间隙状态能实时反映加工过程状态，它与断丝现象之间的关系非常密切。断丝的发生具有突然性，断丝过程转瞬即逝，要准确地在断丝瞬间记录下断丝前的放电间隙状态对检测系统有较高的要求，这不仅要求在不同加工条件下进行大量的试验，而且要求检测系统能长时间连续地对加工过程进行检测。在检测系统中，采样周期时间是一个关键性参数。当采样周期时间过长时，间隙状态时间百分比率值变化过于缓慢，检测系统将不能迅速地检测到加工状态的变化；当采样周期过短时，间隙状态时间百分比率值变化过于显著，检测系统将不能区分稳定加工和异常加工的状态，此外还提高了对检测系统硬件实现的要求，增加了对硬件资源的占用。采样周期时间的确定与断丝先兆持续时间有密切关系，原则上，采样周期时间最长为断丝先兆持续的一半时间。对于高速走丝电火花线切割断丝先兆持续的时间目前尚无研究，在确定采样周期时间上可借鉴低速走丝电火花线切割断丝研究的成果。低速走丝电火花线切割断丝先兆的研究成果见表3.6-6。

表3.6-6　低速走丝电火花线切割断丝先兆研究

研究者	研究机构	研究结果
Tanimura 和 Heuvelman	日本大阪精密工业技术研究所	断丝前30 ms或更长一点时间，短路的频率会非常高
N. Kinoshita 和 M. Fukui	日本东京大学	断丝前5～40 ms，火花放电频率会急剧增加
M. Jennes 和 R. Snoeys	比利时鲁文大学	断丝前15～25 ms，放电间隙消耗的功率明显增加
黄因慧	南京航空航天大学	1）断丝前10～20 ms，正常放电频率突然增加 2）断丝前40～50 ms，加工过程不稳定
K. P. Rajurkar 和 W. M. Wang	美国内布拉斯加林肯大学	火花放电频率检测仪采样周期时间设定为10 ms

4）断丝控制策略研究　断丝前有先兆为通过控制的方法来防止断丝发生提供了重要的基础。在断丝现象研究上，针对低速走丝电火花线切割加工的研究较多而且研究较深入，防断丝控制研究取得了较明显的进展；而针对高速走丝线切割加工中断丝现象的研究非常少，研究的深度很不够。在高速走丝线切割加工断丝问题上的研究，有关研究指出“不夹杂开路或短路状态的持续放电脉冲串”是断丝的先兆，并用切断高频电源的方法来防止断丝的发生。实际上，高速走丝电火花线切割加工中断丝的发生很复杂，与低速走丝电火花线切割相比有自己的特点；在防断丝控制上，切断脉冲电源的方法是保守的。在电火花线切割加工中，脉冲间隔的增大能够迅速减少向加工间隙输入的放电能量，同时脉冲间隔变大，使放电间隙电蚀产物排除的时间增加，将能有效改善放电集中现象，使断丝发生的机会大大降低，这一点已在低速走丝电火花线切割断丝研究中得到了验证。

在高速走丝线切割加工中，对加工间隙状态进行连续检测，当发现断丝的先兆时，立即对电火花线切割有关工艺参数进行调节以改善加工间隙中的恶化状态，可以有效地防止加工中断丝的发生。由于高速走丝电火花线切割断丝先兆持续的时间较短，防断丝控制的实时性要求高，因此选择恰当有效的被控制的工艺参数非常重要。从电火花线切割工艺参数控制的响应速度来看，电源参数的控制响应速度是最快的（微秒级）；此外在电源参数中，脉冲间隔增大，将使放电间隙间的电蚀产物排除的时间增加，能有效改善放电集中现象，使断丝发生的机会大大降低，这使脉冲间隔成为首选控制参数。大量的试验研究表明，在高速走丝电火花线切割加工中，峰值电流的调节将能够迅速改变向加工间隙中输入的脉冲能量，由于电火花线切割断丝的发生多出现于大能量加工条件下，因此一旦加工状态出现恶化，则迅速降低加工中峰值电流以减少向加工间隙输入的能量来避免断丝的发生。

（4）电火花线切割伺服进给模糊控制研究

在电火花线切割加工过程中，被切割工件固定在工作台上，依靠伺服进给控制系统控制工作台的进给和回退来维持电极丝与工件之间的距离（放电间隙）。放电间隙大小直接影响加工速度，在工件厚度不变时，放电间隙与加工速度之间的关系如图3.6-37。电火花线切割加工维持在最佳放电间隙时，放电蚀除工件速度与工件进给速度将维持一个动态平衡，此时正常火花放电的概率最大，使电火花线切割处于高速、高质量的加工状态中；当放电间隙太大时，脉冲电压由于不能及时击穿极间的液体介质，大大降低电源脉冲的利用率，同时还会因极间距离太大而使放电通道中的热能传递到工件上的部分明显减少，使加工速度降低；当放电间隙过小

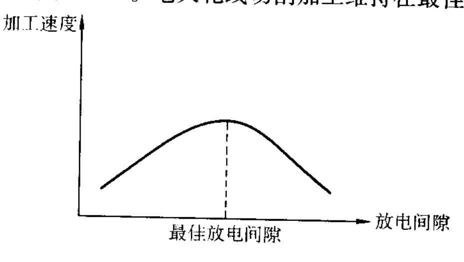


图3.6-37　电火花线切割加工电蚀特性曲线



时，电极丝与工件易发生短路，此时工件材料不被蚀除，同时由于放电间隙过小，使电蚀产物难以及时排除，电蚀产物浓度过大，易产生二次放电，大量的脉冲能量消耗在电蚀产物的重融上，这些都使加工速度明显降低。

由于加工中工艺参数选择不同，以及放电间隙中液体介质绝缘性的变化，最佳放电间隙大小是不断变化的。因此，如何实时检测加工中放电间隙状态的变化，判断当前放电间隙大小是否合理，并以适当的控制策略来调节放电间隙大小，使它始终保持为最佳放电间隙，是伺服进给控制系统的主要功能。

1）伺服控制研究综述　电火花线切割伺服系统的研究可分为两个方面。

① 对机床伺服系统机械部分进行改进。日本 Sodick 公司创造性地在电火花线切割机床的伺服系统上使用直线电机进行驱动。采用直线伺服系统，省去了丝杠传动环节，在伺服运动中去除了中间环节的损失和响应的滞后。特别是在精加工过程中，仅数毫秒的高速响应和大于 $1g$ 的加速性能，确保了可实现电火花微观过程小间隙的持续性。伺服机构的改进为实现机床的精密伺服控制和保持长期的加工精度提供了基础。

② 对伺服进给系统的控制方法进行不断改进。控制系统是电火花加工机床的灵魂，由于电火花线切割加工过程的复杂性和随机性，对加工控制系统提出了很高的要求，关于伺服控制系统的研究一直在进行。目前各种控制方法的差异主要在于控制参数、评价标准以及控制算法的不一致。由于控制系统的改进可以在不改变伺服机构的条件下，运用计算机软件技术来提高机床的加工性能，具有很高的性能价格比，这使得伺服控制系统的研究成为电火花线切割机床伺服系统研究的热点。

在电火花线切割加工中，伺服进给控制的目的是保持最佳放电间隙大小，以使正常火花放电状态的概率最大。目前，电火花线切割机床的伺服控制系统主要采用反馈控制的方式来控制放电间隙（见图 3.6-38）。电火花伺服控制系统的最难点是无法直接检测加工中放电间隙大小。

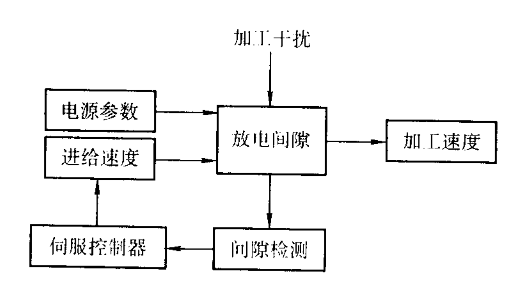


图 3.6-38　电火花线切割放电间隙控制示意图

比利时鲁文大学的 J.P.Kruth 教授指出，直接采样正面的放电间隙几乎是不可能的，所有伺服控制系统都是通过间接地感受放电间隙大小来对放电间隙进行控制的，没有一个感受参数能准确评价真实的放电间隙大小。间接感受放电间隙的检测量与进给控制器的控制量之间关系是复杂的、高度非线性的，这使得伺服控制的研究具有相当的难度，一直是电火花线切割加工技术的研究重点。电火花线切割放电间隙是一个具有较强不确定性的受控对象，要设计满意的伺服控制器是相当困难的。对于这样一个控制对象，适用于线性对象的经典控制方法是难以取得最优效果的。自适应控制能在受控对象的模型和对象所处环境的知识知之不全甚至很少的情况下，给出高质量的控制品质。比较成熟的自适应控制系统有模型参考控制系统和自校正控制系统。由于难以建立准确的电火花线切割放电间隙变化的参考控制模型，可以实现型参数在线辨识的自校正控制系统在电火花线切割伺服系统的研究较多。这种伺服控制系统一般先设定控制模型的结构，如保加利亚中央机械工程研究所的 P.videlov 教授设计了 PI 型伺服控制模型；哈尔滨工业大学的白基成博士采用了多阶差分预报模型，章伟和周正干等通过试验确定系统的预报模型为二阶模型，然后通过系统实际观测的数据对模型参数进行估计，采用的方法有最大似然法以及带有遗忘因子的最小二乘法来递推辨识模型参数。这些自校正伺服控制系统的区别在于控制系统的控制目标是不同的。

上述伺服控制研究是针对电火花线切割放电间隙大小进行控制的。然而，在电火花线切割加工中，火花放电频率（单位时间内正常放电脉冲的个数）的高低和波动不仅关系到加工速度，而且与加工稳定性及断丝的发生密切相关。因此，比利时鲁文大学的 R.Snoeys 教授以及美国内布拉斯加林肯大学 Rajurkar K.P 教授都认为火花放电频率的控制是电火花线切割伺服控制研究中应重点考虑的问题。Rajurkar K.P 教授认为切割不同厚度工件时加工中的最佳火花放电频率不同，因此必须对工件厚度实时检测。为在线识别工件厚度，他们建立一个多输入参数模型，由放电间隙电压量、伺服进给量和实时检测的火花频率来识别工件厚度。该模型使得在伺服进给不稳定时也能对工件厚度识别有很高的准确性。他们还通过试验建立了工件厚度与最佳火花放电频率关系的公式，当工件厚度识别后，最佳的火花放电频率也就确定了。在控制火花放电频率上，他们同样采用了自校正控制理论建立了一阶控制模型，模型参数采用在线递推辨识以适应放电加工的强随机性。试验表明，该控制策略在变厚度切割条件下也能始终维持最佳的火花放电频率，保持高效、稳定的切割加工，同时能有效避免断丝的发生，这在电火花线切割加工自适应控制研究中是相当先进的。

2）现有伺服控制系统分析　目前，高、低速走丝电火花线切割机床的伺服控制系统主要是调节伺服参考电压或反馈增益的控制系统。

高速走丝电火花线切割伺服控制系统中具有较强的非线性，造成非线性的原因主要是变频进给系统中检测环节的采样值（一般为放电间隙的平均电压）与放电间隙大小之间的非线性关系。在高速走丝电火花线切割加工中，放电间隙的开路电压远高于放电加工电压，而短路电压则较接近于放电加工电压。此外，加工中的开路电压还随加工条件不断变化，而放电加工电压和短路电压又不随加工条件变化，因而造成这种非线性本身还具有相当的不确定性，这些特性都给伺服控制系统的调节带来了困难。在高速走丝电火花线切割加工中，伺服系统中是以电压量来驱动伺服机构的，这造成了当放电间隙处于开路状态时，控制系统的反馈作用特别大；而当处于正常放电状态时，伺服控制系统的采样信号的灵敏度就大为降低，控制系统的反馈作用变弱，甚至接近于失灵，而此时正是伺服进给系统应紧密跟踪的时刻。伺服系统检测量与放电间隙状态之间的非线性和不确定性给伺服控制系统的设计带来困难，这点也是放电加工控制所特有的。

从控制系统结构上来分析，现有的高速走丝电火花线切割机床的伺服进给控制系统是一个负反馈比例控制系统。该控制系统是检测放电间隙的平均电压 U_g，当检测到某一时刻的放电间隙的平均电压 U_g 高于所设置的门槛电压（参考电压）U_r时，则产生一个偏差值，该偏差值使伺服机构产生进给动作，调节放电间隙的大小。比例控制系统的特点是，偏差量一旦产生，控制器将立即产生控制作用，使控制量向减小偏差的方向变化，而控制作用的强弱取决于比例控制系数 K_p（在反馈控制系统中又称反馈增益系数），加大 K_p 值可以提高系统动态响应速度，减小系统稳态误差；但

当 K_p 值过大时，会导致控制系统的输出变化速度过大，从而产生过大超调而使整个控制系统处于不稳定或振荡的状态。因此，在控制系统的设计时，很少单独使用比例控制规律。高速走丝电火花线切割机床采用这种控制方式来进行伺服进给控制，也正是要求机床操作者具有一定的经验才能使加工正常的原因。图 3.6-39 给出了高速走丝电火花线切割伺服控制系统的结构图。

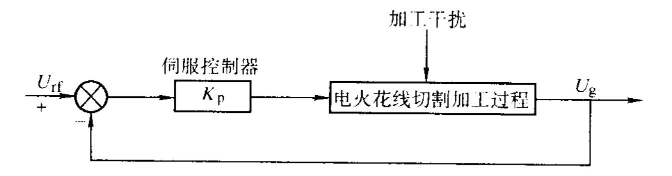


图 3.6-39 高速走丝电火花线切割伺服控制系统结构图

理论上，如果能调节反馈增益系数 K_p，使进给控制特性曲线交于电蚀特性曲线的峰顶，如图 3.6-40，则可以获得在给定加工条件下的最大加工速度，并可以依靠负反馈的作用，维持加工状态稳定在峰顶点附近的一个区域。

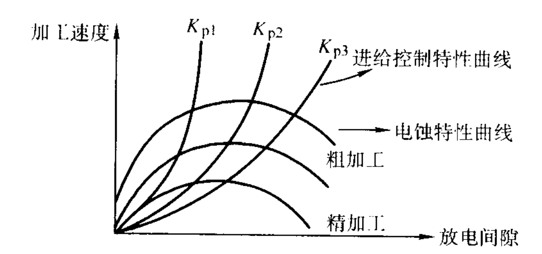


图 3.6-40 高速走丝电火花线切割伺服特性曲线

实际上，下面的因素使现有的伺服进给反馈控制系统难以调整到上述的理想状态。

① 由于加工过程中外界的干扰，加工本身的飘移，以及加工条件的改变，如切割厚度的变化等，造成电蚀特性曲线本身在不断变化，因此进给控制特性曲线通过它的位置也就随之而变。而比例控制系统本身不具备自动识别最佳加工状态的能力，当原来的最佳工作点已移动，现有的控制系统由于在线识别加工状态的能力低而无法判别，同时不能自动调节控制系统参数来跟踪状态的变化。目前，机床操作者仅能依靠长期积累的经验来设置控制系统的内部参数，如伺服参考电压或反馈增益系数，而这对于经验不足的机床操作者是一个很大的困难，难以调节到最佳的加工状态。

② 由于伺服系统中各个环节的延迟，使系统难以调整到理想的加工状态。在伺服系统中，放电间隙的变化对加工速度的影响最快；而进给控制对加工速度的影响要慢，这是由于机床伺服系统的机械传动的刚度是有限的且存在传动间隙和摩擦，当工作台加、减速时，会使电机与工作台之间的运动不一致，有近毫秒级的延时。这些都使反馈控制作用易滞后于加工干扰对放电间隙的影响。尤其在加工线速度低时，如精加工或大厚度加工时，反馈作用的滞后就很大，经常出现加工干扰已经回复或已反向，反馈控制作用才姗姗来迟，结果负反馈变成正反馈，不仅不能抑制干扰，而且加剧干扰，表现为进给不均匀，加工不断在短路和开路之间换来换去，严重影响了加工速度。

3）模糊控制技术　模糊控制技术是在模糊集合论和模糊逻辑推理等理论基础上发展起来的计算机控制技术。同建立在精确数学模型的经典控制理论和现代控制理论相比，模糊控制更适合于多输入非线性、时变或具有高度不确定性的系统的控制。模糊控制器的规则设计可充分利用熟练操作人员及专家的长期积累的经验，此外，现在已将自适应和学习能力引入到模糊控制中，使模糊控制规则、隶属函数和模糊量化在控制中可自动调整和完善，可以实现对复杂过程对象的有效控制。模糊控制的这些特性非常适合电火花加工控制的，模糊控制技术已经运用到电火花成形机床的加工控制系统中，机床加工性能得到了显著提高。

模糊控制的基本思想是将专家知识或操作人员经验形成的语言规则转化为模糊控制规则，以模糊集合论、模糊语言变量及模糊逻辑推理为基础的一种非线性控制。根据模糊逻辑推理理论设计的控制器称为模糊逻辑控制器（简称模糊控制器），它运用语言知识模型进行控制算法的设计和修正，可对不能精确建模或难以建模系统进行控制。

图 3.6-41 给出了模糊控制器的基本结构图，它包括了三大基本模块：模糊化接口、模糊推理机和解模糊接口。模糊推理机是由知识库（数据库和规则库）和模糊逻辑推理来提供模糊控制算法的。

模糊控制过程分三个步骤：模糊化、模糊推理和解模糊化。这三个步骤分别在图 3.6-41 中的三个基本模块中完成。

① 模糊化　模糊化是指通过传感器将受控对象的相关物理量转成电量，且将以数字量输入到计算机中。接着将此数字量的变化范围影射到相应的论域，并将论域中该数字量转换成相应的语言变量的术语，构成模糊集合。这样精确输入的量转换为用隶属函数表示的一个模糊变量的值，由此才能将检测到的量作为模糊控制规则中的条件来进行推理。

② 模糊逻辑推理　根据有经验的操作者或专家的真实制定出模糊控制规则，运用模糊数学理论对模糊控制规则进行计算推理，以得到一个模糊输出集合，也即用模糊化后的输入值取适配模糊控制规则，为每个控制规则确定其适配的程度，并通过加权计算合并这些规则的输出以得到一个新的隶属函数，这是一个确定的输出范围。在模糊逻辑控制中广泛应用的有玛达尼推理方法。

③ 解模糊化　模糊推理获得的是一个模糊集合，但实际应用中，必须选择一定的方法在推理得到的模糊集合中取一个相对最能代表这个模糊集合的量作为模糊控制器输出量来进行控制。

和传统控制方法相比，模糊控制具有的优点在于：①模

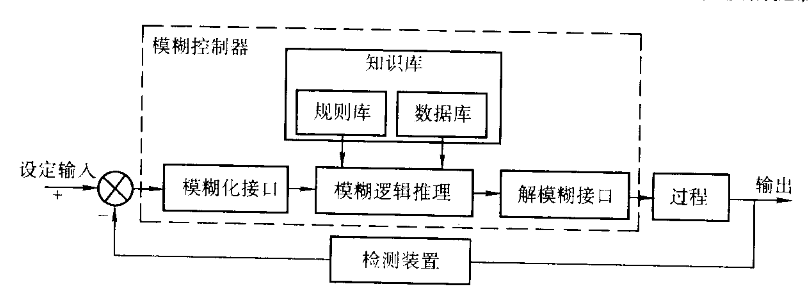


图 3.6-41 模糊控制器的基本结构



糊控制系统无需对被控对象进行精确的数学建模，而是根据经验规则直接建立控制模型；②系统知识库是基于对控制对象的定性认识和经验规则来建立的，而控制是直接通过运用语法规则进行模糊推理来进行的；③模糊控制系统是非线性系统，具有很强的鲁棒性，尤其适应于非确定性和非线性系统。模糊控制的优点使模糊控制方法在众多领域中得到了大量的研究和应用。

模糊控制技术是最近几年才应用到电火花线切割加工中的，台湾地区的 M.T.Yan，Y.S.Liao 等在 1997 年对低速走丝电火花线切割机床的脉冲间隔和伺服参考电压进行了模糊控制的研究。研究表明，与传统的控制相比较，采用模糊控制技术具有良好的自适应能力，控制器可以由放电间隙状态的检测来感知加工条件的变化从而自动调节控制参数，如同一个熟练的机床操作人员，实验取得了较满意的效果。

4）进给模糊控制模型研究　现有的高速走丝电火花线切割机床的伺服进给控制系统是一个负反馈比例控制系统，该控制系统是建立在“放电间隙平均电压高，则放电间隙大”的原则上。然而，放电间隙平均电压高低与放电间隙大小之间的关系是非线性的，仅依靠这一原则进行进给控制是难以实现更优加工性能的；此外，比例控制器没有自我调节的功能，控制系统的内部参数如伺服参考电压和比例控制系数的离线设定和在线调节都依赖于有经验的机床操作者手工完成，因此机床自动化程度低、操作难度大。

在高速走丝电火花线切割加工中，当放电间隙大于最佳放电间隙时，则开路状态的脉冲出现的概率将明显增加；当放电间隙小于最佳放电间隙时，则短路状态的脉冲出现的概率将明显增加，因此，通过检测加工中在一段时间内开路状态和短路状态的相对时间比率值的变化，将能更好地识别放电间隙状态的变化；另一方面，由于电火花线切割电源脉冲频率较高，且放电加工本身具有较强的随机性，检测一段时间内三种间隙状态的相对时间比率值也有利于排除偶然发生的现象，更准确地反映放电间隙的状态，这一点对电火花线切割进给控制系统而言也具有重要意义。

图 3.6-42 是一种典型的模糊控制模型，在现有进给控制系统基础上引入了新的反馈控制环，该控制环采用双模糊控制器并联结构，即由开路模糊控制器和短路模糊控制器采用并联形式组成一个反馈控制环。这两个模糊控制器的结构都是标准的两输入 - 输出的模糊控制器。

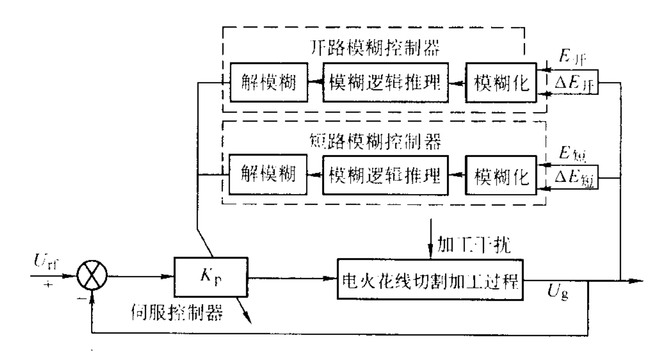


图 3.6-42　电火花线切割伺服进给模糊控制模型结构图

上述伺服进给模糊控制模型的控制原理是：当放电间隙状态处于“过大”时，反馈控制环中由开路模糊控制器产生控制作用；当放电间隙状态处于“过小”时，反馈控制环中由短路模糊控制器产生控制作用。整个进给控制系统的控制目标是将放电间隙大小维持在最佳状态上，获得尽可能高的正常放电时间比率水平，并将控制在这一水平上。

具体而言，在进给模糊控制模型中，开路模糊控制器输入是开路状态相对时间比率偏差（$E_开$）和偏差变化率（$\Delta E_开$），控制器输出是比例控制器系数调节量（ΔK_{p1}）。开路模糊控制器的控制策略是当检测到放电间隙中开路状态相对时间比率值增加，且增加很快时，即表明放电间隙向“过大”状态变化时，则立即增大 K_p，使进给量加速，减小放电间隙。短路模糊控制器输入是短路状态相对时间比率偏差（$E_短$）和偏差变化率（$\Delta E_短$），控制器的输出也是比例控制器系数调节量（ΔK_{p2}）。短路模糊控制器的控制策略是当检测到放电间隙中短路状态相对时间比率值增加，且增加很快时，即表明放电间隙向“过小”状态变化时，则立即减小 K_p，使进给量减速，增大放电间隙。伺服进给控制系统采用双模糊控制器并联结构，将能使控制系统灵敏地感受到放电间隙状态中的异常变化，即大量开路状态或短路状态的出现，并自动采取控制策略来调节放电间隙大小，使放电间隙大小维持在最佳状态上。

编写：李明辉（上海交通大学）
李明奇（上海交通大学）



参考文献

1 刘晋春，赵家齐，赵万生主编．特种加工．第4版．北京：机械工业出版社，2004

2 郭永丰主编．电火花加工技术．第2版．哈尔滨：哈尔滨工业大学出版社，2005

3 徐小兵，毛利尚武．日本电火花加工技术的发展动态．电加工与模具，2003（1）：1～3

4 余承业主编．航空制造工程手册：特种加工分册．北京：航空工业出版社，1993

5 孟少农主编．机械加工工艺手册：第2卷．北京：机械工业出版社，1991

6 陈济抡．特种加工技术在航天发动机制造中的应用．电加工与模具，2003（2）：13～15

7 李明奇，李明辉．WEDM－HS加工质量控制系统框架及其关键技术．第三届模具实用制造技术交流年会，2003

8 甘屹，齐从谦．WEDM数控系统的特点、发展与创新．电加工与模具，2003（2）：5～9

9 刘立兵，朱国锋，李明奇．嵌入式Linux与现代模具加工数控设备．电加工与模具，2003（2）：1～5

10 伍俊．电火花线切割智能加工系统的关键技术研究：[博士论文]．上海：上海交通大学，2001

11 楼乐明．电火花加工计算机仿真研究：[博士论文]．上海：上海交通大学，2000

12 刘立兵．基于Linux的电火花线切割数控系统的研究：[博士论文]．上海：上海交通大学，2003

13 孙昌树著．精密螺纹电火花加工．北京：国防工业出版社，1996

14 苏州电加工机床研究所．电加工及模具．1996～2005年各期



中 国 材 料 工 程 大 典
CHINA MATERIALS ENGINEERING CANON
第 24 卷 材料特种加工成形工程（上）

第 4 篇

材料电化学加工技术

主　编　徐家文
主　审　朱树敏
副主编　云乃彰　王建业　田继安　范植坚　徐文骥
编　写　范植坚　康　敏　钱　密　朱永伟　云乃彰
陈远龙　张永俊　徐家文　王建业　田继安
王天诚　侯中一　干为民　曲宁松　徐文骥
任仲根
审　稿　中国材料工程大典编委会

中国机械工程学会
中国材料研究学会
中国材料工程大典编委会


蓝天CAD论坛
CNCAD.NET



第1章　电解加工基本原理

1　电解加工过程的电化学基础

1.1　电解和电解加工

电解和电解加工都是基于电化学反应获得制品的工艺技术，比如电解精炼铜，将粗铜接电源正极，进行阳极溶解，控制一定条件（电压、温度、电解液浓度）使电解液中的铜离子沉积到负极，得到精铜；又比如电解水，也是通过控制电压等条件分别在正负极获得高纯度的氧气、氢气的；利用电解的方法还可以使氯化钠变成烧碱、氯气、氢气；可以使无机物分解，也可以进行有机合成。总之，电解这种技术是通过调节给定电压，为电极上某种反应物分子提供足够的能量，当达到该种物质放电电位时，反应发生，得到制品。电解加工也是在外电源作用下使某种金属发生电化学阳极溶解的过程，但是制品不是化工和冶金产品，而是具有一定尺寸精度的零件。

1.1.1　电解加工装置——实现电解加工的电化学系统

为了实现成形加工，电解加工需要在相应机床上完成，其配套的设备还有电源、电解液循环系统以及按照加工对象而专门设计的阴极、夹具。实现型孔、型腔电解加工的机床外形上类似于铣床，而深孔、膛线电解加工机床又与深孔钻机床相像。电解加工与机械加工的区别之一是作为工具的阴极不直接与被加工零件接触，而是隔着间隙以电化学反应的形式完成去除过程。因此电解加工装置虽然貌似机械加工机床，但就其加工实质而论，是一个可实现电解加工的电化学系统。在这个系统中，把将要发生电化学反应的两极，即工件和工具分别接到外电源的正、负极，两极之间保持一定的间隙（通常称为加工间隙）并充满电解液，构成了传统意义上的“电解槽”，而“电解槽”之能够连续充满并高速流过电解液，则是由泵、管道、夹具、工件所构成的流场设计来实现。与一般电化学系统一样，电解加工装置的导电回路由两类导体组成，但导电回路（如图 4.1-1 所示）由三段组成：从电源到电极之间的导线、电解质溶液以及电极与电解液之间的界面。其中导线段由金属晶格中的自由电子进行导电，称第一类导体；电解质溶液段由电解质溶液中的离子在外电场作用下作定向运动完成导电，称第二类导体。电子只可能在金属导体中作为导电粒子移动，而离子的导电也只能在溶液中进行；如何从第一类导体的电子导电过渡到第二类导体的离子导电，其核心就是在电极与电解质溶液界面上进行电化学反应并实现电子交换。

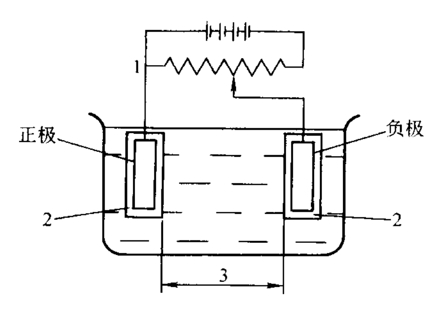


图 4.1-1　电化学系统导电回路示意图

1—导线；2—界面；3—电解质溶液

当外电源通过导线把电子送到负极（从正极取走电子）时，负极上多余的电子（正极上多余的正电荷）会通过静电作用吸引电解质溶液中的正离子（正极则吸引负离子）到电极附近，当电压达到某种离子的放电电位时，就会发生电子得失的电化学反应，正离子到负极还原，负离子到正极氧化，或者接正极的金属本身的原子失去电子变成正离子溶解下来。这种界面上发生的电化学反应完成了使电子消失或产生、离子复合或形成的过程，从而完成从导线的电子导电向电解质溶液的离子导电的过渡。

以对铁质工件进行电解加工为例，在负极，将发生外电路输送来的电子与电解质溶液中的正离子相结合的还原反应：

$$2H^+ + 2e = H_2$$

在正极，将发生铁原子失电子的氧化反应：

$$Fe - 2e = Fe^{2+}$$

可见，电极和电解质溶液界面上的电化学反应就象一座桥，沟通了第一类导体和第二类导体组成的导电回路。电化学反应实现了载流子的切换，即实现了电子导电向离子导电的过渡，伴随着这种过渡，电解加工也就得到实施。界面上如果不发生电化学反应，电化学装置处于断路状态，电解加工就无从谈起，因此，电解加工装置作为一种电化学系统，实现其功能的关键是界面上的电化学反应。

电解加工除了在电极界面上发生电化学反应外，两极间的电解液中还发生着一系列传质过程，在电化学的理论研究和生产实践中，通常把电流通过电极和溶液界面时发生的一系列变化（包括上述的电化学反应）称为电极过程，它包括：

1) 反应粒子向电极表面迁移（包括电迁移、对流、扩散），称为液相传质步骤；

2) 反应粒子在电极表面或附近液层中进行某种转化，如吸附、络合离子配位数的变化（这些变化的反应速度与电极电位无关），称为前置转化步骤；

3) 反应粒子在电极两相界面得失电子，称为电化学反应步骤；

4) 反应产物在电极表面脱附或附近液层中复合、分解、歧化及其他化学变化，称为随后转化步骤；

5) 反应产物从电极表面向溶液深处扩散，或进一步生成新相，如气体从电极表面析出、固相从溶液中沉积到槽底。

1.1.2　电解加工与电解过程的区别

电解精炼铜、电解水、电解合成等电解过程均获得了某种或某几种冶金或化工产品，其生产过程较多注重产品的纯度、收率、能耗等。电解加工得到的应当是具有一定形状和尺寸的制品，它关心的是零件的精度和表面质量。电解加工中，零件接到电源的正极，工具接电源负极，使工件阳极按照工具阴极的形状进行选择性的蚀除。实质上，电解加工是在电化学抛光的基础上经过重大革新发展起来的，采用大功率电源，通过夹持阴极的机床主轴头的持续送进，维持阴阳极之间的一定距离（静止加工除外），高压泵向间隙输入高速流动的电解液，及时带走蚀除产物和热量，实现工件阳极的高速溶解成形（图 4.1-2）。

正是电解加工的一整套特殊的设备，提供了比其他电化学生产高几个数量级的电流密度，才能使电解加工有高效率的成形速度，也正是因为电解加工在这么高的电流密度下进行，使得电解加工又区别于一般电解，不能完全按照低电流密度条件下的常规电化学规律来认识，即用经典电化学理论



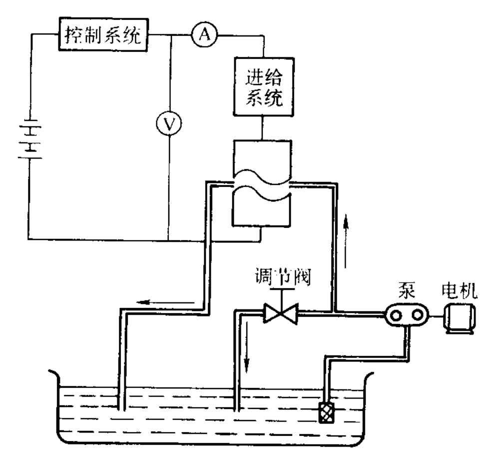


图 4.1-2　电解加工装置原理图

还难于完全解释电解加工过程中的电极过程，而需要在新的实验和测试基础上进行分析研究；同时由于电解液的高速流动、电迁移等传质过程也被极大地强化从而也影响电极过程。一般而言，电解加工与电解精炼的区别可概括于表 4.1-1。

表 4.1-1　电解加工与电解精炼的比较

比较项目	电解精炼	电解加工
i	几 A/dm^2	10～500 A/cm^2
u_1	电解液静止	5～30 m/s，流速高是为了满足电极过程动力学的需要，及时排出产物和欧姆热量
P_1	0	0.4～3 MPa
电极间距	≥100 mm，对电解过程影响不大，仅影响欧姆压降	0.1～1.0 mm，对电解加工的工艺指标有极大影响，特别是对精度和加工稳定性
电极	根据生产目的选择阳极材料，对材料的金相组织无特殊要求	要求阳极金相组织均匀，阴极有严格的尺寸和形状精度，有良好加工性能
设备	电源、电解槽	电源、机床、电解液循环系统、控制系统
对电解液分散能力的要求	电解要求电流分布均匀，电解液的分散能力好	电解加工要求电解液的集中蚀除能力好，对已加工面不再腐蚀
电极过程	常规	速度极高、电流密度在电极表面选择性分布，电极电位远远偏离平衡电位
工艺指标	产品的纯度、收率、能耗	零件的精度、表面粗糙度及其他表面质量

1.1.3　电解、电解加工装置与原电池系统的区别

在所有的电化学装置中，进行氧化反应的电极被称为阳极；进行还原反应的电极被称为阴极。或者说，使得正电荷从该极进入溶液的电极称为阳极；而使得正电荷离开溶液进入该极的电极称为阴极。电解和电解加工都是将发生氧化反应的电极连接到外电源的正极，将发生还原反应的电极接到外电源的负极，因此，电解和电解加工的正极就是阳极，负极就是阴极。这个情况与另一类电化学系统——原电池的情况恰恰相反，原电池的正极是阴极，负极是阳极。原电池的工作原理是选择能在某种电解质溶液中自发进行氧化反应的金属和能自发进行还原反应金属组成电化学系统，随着反应的进行，发生氧化反应的一极即阳极将富有电子，显电负性，发生还原反应的阴极则缺电子，显电正性，这时，如果用导线把两极连接起来，电子就由阳极流向阴极。按照电工学的规定，外电路里电流是由正极流向负极（电子由负到正），对原电池来说连接两极的导线是外电路，因此原电池的阳极是负极，阴极是正极。电解和电解加工装置本身就是外电路，电流由阳极通过电解液流向阴极，因此阳极是正极，阴极是负极。按照上述电解池和原电池中阴阳极和正负极的关系，在图 4.1-3 中标出两极电位随电流变化的情况，当外电流等于零时，电解池的阳极电位应当标在横坐标轴的正半轴，阴极电位标在负半轴，而原电池正好相反，阳极电位标在横坐标轴的负半轴，阴极电位标在正半轴。随着电流的增加，由于电极极化的原因，电解槽的槽压增高；同样因为极化，原电池的电动势却随电流增大而减小。总之，电解和电解加工与原电池的根本区别在于，前者发生的反应是强制性的，电能转化为化学能，随着过程的进行，所需的槽电压增高；后者原电池中发生的过程是自发的，化学能转变为电能，随着过程的进行，所产生的原电池的电动势降低。

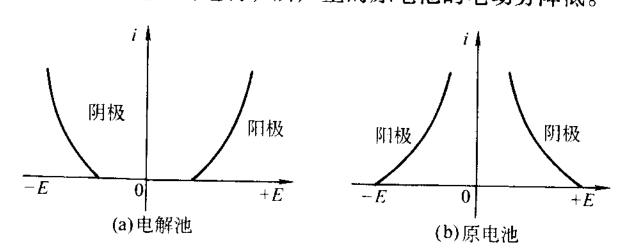


图 4.1-3　电解装置、原电池的电极电位－电极电流的不同变化趋势

1.2　电极电位、电极反应及电极反应的顺序

1.2.1　电极与双电层

对电解加工而言，通常将工件（阳极）和工具（阴极）都称为电极。而从电化学理论看，电极是指电解质溶液及与电解质相接触的电子导体或半导体、并连同其周围电解质溶液的多相体系，而不只是电极片（棒）本身。比如，当铁片插入氯化亚铁水溶液中，形成的电极是 Fe/Fe^{2+}，铜片插入硫酸铜溶液时，形成的电极是 Cu/Cu^{2+}，而不只是铁片或铜片本身。如此定义电极，将能够确切反映电极过程；或反言之，以电极反应将能更确切说明电极的实质。下面将以实验研究事实对此进行论述。

未将金属或半导体的电极片（以下简称金属）插入电解质溶液之前，金属中的某一组分 i 与其在电解质溶液中的化学位不相等；将金属插入电解质溶液后，两相接触就会发生组分 i 从化学位高的向化学位低的方向转移。而电化学位的高低可以衡量带电粒子能级的高低，其趋势是一致的，就是说，带电粒子自发地从电化学位高（能级高）的相向电化学位低（能级低）的相转移，直到电化学位相等，达到平衡：

$$\mu_i^A + nF\phi^A = \mu_i^B + nF\phi^B \tag{4.1-1}$$

式中，μ_i 为 i 相的化学位；ϕ 为金属与溶液的内电位差；A 为金属相；B 为溶液相。

当铁片插入某一浓度的氯化亚铁水溶液中时，如果亚铁离子在金属铁上的化学位比它在该浓度的氯化亚铁水溶液中的化学位高，亚铁离子就有进入溶液的趋向，溶液中极性很强的水分子会与铁片表层的铁原子结合成水化铁离子，使之脱离晶格进入溶液，从而使铁片上有了剩余电子，这个过程

是自发的。随着过程的进行，铁片的电负性增加，逐渐吸引溶液中的正离子（Fe^{2+}），使之分布在接近铁片的周围液层中，当然，由于热运动，被静电吸引过来的正离子又有回到溶液深处的趋势，另一方面，溶液中亚铁离子增加，使得亚铁离子得到电子还原成铁原子的过程加速，也就是说逆过程加速、正过程减慢，经过一段时间，界面上正、逆反应达到新的平衡：

$$Fe \rightleftharpoons Fe^{2+} + 2e$$

于是电极附近溶液的电荷就不再改变，电荷在电极和溶液界面大致呈双层排列，在理论电化学中称之为双电层，即在电极表面上，电荷基本上是在表面整齐地排成一层；在溶液的一侧，离子既不是紧密地紧靠电极表面排列，也不是全部分散到较远的溶液深处，因为静电引力和热运动两个方向相反的作用，使一部分离子停留在距电极表面 1 个水化离子半径的位置，称为紧密层，另一部分离子较散地分布在外围，称为分散层。相应地，可以将电极和溶液间的电位差分成两部分，前一部分称为紧密层电位（$\phi_a - \psi_1$），后一部分电位差称分散层电位 ψ_1，如图 4.1-4 所示，犹如一个电容器。因为金属在插入电解质溶液后建立起双电层的过程是自发的，金属在插入和未插入电解质溶液前的状态不同，并且，插入不同电解质溶液后建立的双电层也不同，电化学把金属插入电解质溶液后建立的双电层定义为电极，表达了这种多相体系的实际特征。因此，电极的概念包括金属及其周围临近溶液的整个体系。

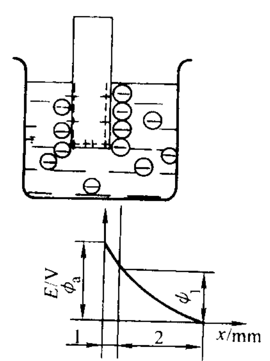


图 4.1-4　双电层示意图

1—紧密层，电位差为 $\phi_a - \psi_1$；2—分散层，电位差为 ψ_1

1.2.2　电极电位与电极反应

上述 Fe/Fe^{2+} 电极的双电层电荷达到动态平衡时，电极中金属体和相邻溶液的电位的差值不再改变，也就是说一个动态平衡对应着一个不变的电位差，这就是电极电位。它是金属内部和溶液内部真正的电势之差，也称绝对电极电位。但是这个绝对电极电位实际是测量不出来的。因为测量时必须使金属一方（Fe）与溶液一方（Fe^{2+}）均与测量电表接通，以便形成一个测量回路，例如，可采用一根铜线，一端接金属，一端插入溶液，如此测量回路形成了，但又出现一个新的金属和溶液界面，形成一个新的电极 Cu/Cu^{2+}；新电极与待测电极（Fe/Fe^{2+}）就构成一个自发电池（原理上可以表达为 $Fe|Fe^{2+} \| Cu^{2+}|Cu$），则测到的电位是这个原电池的电动势，而不是电极 Fe/Fe^{2+} 的绝对电极电位。

为了对不同电极的电位进行比较，引入相对电极电位的概念，按照上述测量的思路，用一个氢电极代替上述测量用的铜导线，使氢电极与待测电极组成原电池，并设定在温度 25℃、氢气分压为 1 atm（101.3 kPa），氢离子活度为 1 mol/L 的条件下，氢电极电位为零，称为标准氢电极电位。以此作为标准，将任一待测金属在其自身盐（浓度为 1 mol/L）中形成的电极，与标准氢电极组成原电池（图 4.1-5），测得该原电池的电动势即为该电极的标准电极电位，这种以标准氢电极作参比电极测得的电极电位称为氢标电极电位。

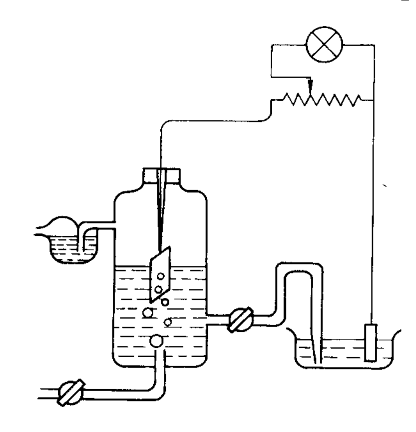


图 4.1-5　与标准氢电极组成的原电池

氢标电极电位是相对电极电位，每一种金属都可以与标准氢电极组成原电池而测得其氢标电极电位。比如欲测铜的氢标电位，其原电池为

$$(-)\ Pt,\ H_2|H^+ \| SO_4^{2-}|Cu\ (+)$$

可测量其电动势而得到铜的氢标电位。不同元素的氢标电位列于表 4.1-2。当然，相对电极电位也可以用其他标准电极（如甘汞电极、氯化银电极）作参比电极测量。

表中的符号“+”、“-”说明该电极的标准电极电位比标准氢电极正或负。如果电解液中有多种可能的反应存在，在阳极总是优先进行电位最负的反应，而在阴极，则优先进行电位最正的反应。比如在电镀铜时，电镀液是硫酸铜水溶液，能够在阴极放电的反应有

$$Cu^{2+} + 2e \longrightarrow Cu$$
$$2H^+ + 2e \longrightarrow H_2\uparrow$$

假定铜离子的浓度为 1 mol/L，则铜的放电电位为 +0.34 V，比氢的放电电位（0 V）正，故阴极上进行的反应是铜的析出。金属的活动顺序，实质就是金属电位顺序，排在氢前面的金属比氢活泼，可以置换氢；而电极电位比氢负的金属在阳极则优先进行氧化反应。

在实际生产中，溶液浓度往往不是 1 mol/L，即非标准状态，其电位必然不同于表 4.1-2 所列的标准电极电位，可以通过奈斯特（Nernst）公式计算：

$$E' = E^\circ + \frac{RT}{nF}\ln\frac{a_{氧化态}}{a_{还原态}} \qquad (4.1\text{-}2)$$

式中，E' 为非标准状态下的平衡电位，V；E° 为标准电极电位，V；R 为气体常数（8.313 J/mol）；F 为法拉第常数（96 500 C）；T 为热力学温度，K；n 为电极反应得失电子数；a 为离子活度，mol/L。

表 4.1-2　一些元素的标准电极电位（25°C）

元素氧化态/还原态	电极反应	电极电位/V
Li^+/Li	$Li^+ + e \rightleftharpoons Li$	-3.01
Rb^+/Rb	$Rb^+ + e \rightleftharpoons Rb$	-2.98
K^+/K	$K^+ + e \rightleftharpoons K$	-2.925
Ba^{2+}/Ba	$Ba^{2+} + 2e \rightleftharpoons Ba$	-2.92
Sr^{2+}/Sr	$Sr^{2+} + 2e \rightleftharpoons Sr$	-2.89
Ca^{2+}/Ca	$Ca^{2+} + 2e \rightleftharpoons Ca$	-2.84
Na^+/Na	$Na^+ + e \rightleftharpoons Na$	-2.713
Mg^{2+}/Mg	$Mg^{2+} + 2e \rightleftharpoons Mg$	-2.38

续表 4.1-2

元素氧化态/还原态	电极反应	电极电位/V
Ti^{2+}/Ti	$Ti^{2+}+2e \rightleftharpoons Ti$	-1.75
Al^{3+}/Al	$Al^{3+}+3e \rightleftharpoons Al$	-1.66
V^{3+}/V	$V^{3+}+3e \rightleftharpoons V$	-1.5
Mn^{2+}/Mn	$Mn^{2+}+2e \rightleftharpoons Mn$	-1.05
Zn^{2+}/Zn	$Zn^{2+}+2e \rightleftharpoons Zn$	-0.763
Cr^{3+}/Cr	$Cr^{3+}+3e \rightleftharpoons Cr$	-0.71
Fe^{2+}/Fe	$Fe^{2+}+2e \rightleftharpoons Fe$	-0.44
Cd^{2+}/Cd	$Cd^{2+}+2e \rightleftharpoons Cd$	-0.402
Co^{2+}/Co	$Co^{2+}+2e \rightleftharpoons Co$	-0.27
Ni^{2+}/Ni	$Ni^{2+}+2e \rightleftharpoons Ni$	-0.23
Mo^{3+}/Mo	$Mo^{3+}+3e \rightleftharpoons Mo$	-0.20
Sn^{2+}/Sn	$Sn^{2+}+2e \rightleftharpoons Sn$	-0.140
Pb^{2+}/Pb	$Pb^{2+}+2e \rightleftharpoons Pb$	-0.126
Fe^{3+}/Fe	$Fe^{3+}+3e \rightleftharpoons Fe$	-0.036
H^{+}/H	$2H^{+}+2e \rightleftharpoons H_2$	0
S/S^{2-}	$S+2H^{+}+2e \rightleftharpoons H_2S$	+0.141
Cu^{2+}/Cu	$Cu^{2+}+2e \rightleftharpoons Cu$	+0.34
O_2/OH^{-}	$H_2O+\frac{1}{2}O_2+2e \rightleftharpoons 2OH^{-}$	+0.401
Cu^{+}/Cu	$Cu^{+}+e \rightleftharpoons Cu$	+0.522
I_2/I^{-}	$I_2+2e \rightleftharpoons 2I^{-}$	+0.535
As^{5+}/As^{3+}	$H_3AsO_4+2H^{+}+2e \rightleftharpoons HAsO_2+2H_2O$	+0.58
Fe^{3+}/Fe^{2+}	$Fe^{3+}+e \rightleftharpoons Fe^{2+}$	+0.771
Hg^{2+}/Hg	$Hg^{2+}+2e \rightleftharpoons Hg$	+0.796
Ag^{+}/Ag	$Ag^{+}+e \rightleftharpoons Ag$	+0.799
Br_2/Br^{-}	$Br_2+2e \rightleftharpoons 2Br^{-}$	+1.065
Mn^{4+}/Mn^{2+}	$MnO_2+4H^{+}+2e \rightleftharpoons Mn^{2+}+2H_2O$	+1.208
Cr^{6+}/Cr^{3+}	$Cr_2O_7^{2-}+14H^{+}+6e \rightleftharpoons 2Cr^{3+}+7H_2O$	+1.33
Cl_2/Cl^{-}	$Cl_2+2e \rightleftharpoons 2Cl^{-}$	+1.358
Mn^{7+}/Mn^{2+}	$MnO_4^{-}+8H^{+}+5e \rightleftharpoons Mn^{2+}+4H_2O$	+1.491
S^{7+}/S^{6+}	$S_2O_8^{2-}+2e \rightleftharpoons 2SO_4^{2-}$	+2.01
F_2/F^{-}	$F_2+2e \rightleftharpoons 2F^{-}$	+2.87

1.2.3 平衡电位和稳定电位

所谓平衡电位，是指当金属插入其自身盐溶液时形成的电极电位，比如铁插入氯化亚铁溶液中，形成电极 Fe/Fe^{2+}，电极上发生的正逆反应为

$$Fe-2e \longrightarrow Fe^{2+}$$
$$Fe^{2+}+2e \longrightarrow Fe$$

经过一段时间后，正逆反应的速度会趋于一致，达到动态平衡。从宏观上看，Fe 和 Fe^{2+} 的量不再改变，电极和溶液间的电位差也不再改变，形成了电极反应电量和物量上稳定的双电层，其所对应的电位就是平衡电位。奈斯特公式只适用于计算非标准状态下的平衡电位。

如果金属插入的溶液不是其自身盐溶液，比如铁插入盐酸溶液，形成的电极是 Fe/HCl，其正逆反应为

$$Fe-2e \longrightarrow Fe^{2+}$$
$$2H^{+}+2e \longrightarrow H_2$$

经过一段时间，电量达到动态平衡，该电极也对应一个不变的电位差，但是物量上是不平衡的，因为逆反应不是亚铁离子的还原，而是氢离子得电子变成氢气。随着氢气的析出，铁也不断地溶解。为区别前述平衡电位（电量和物量均达动态平衡），此称之为稳定电位（电量达动态平衡，而物量不平衡）。电解加工的工件材料可能是铁质或镍基材料，所使用的电解质溶液可能为 NaCl、$NaNO_3$，则电解加工的工件电极是 Fe/NaCl、$Fe/NaNO_3$，其电极电位是稳定电位，采用奈斯特公式计算其电极电位值，只能是一种近似。实际电解加工生产中电极上的反应与平衡状态相去甚远，主要原因是电极极化，在下将专题论述。

1.3 外电场作用下电极的极化及实际电解加工过程的电极反应

1.3.1 电极的极化

上述平衡电位是指金属插入某溶液而没有加外电源的情况，是自发进行得失电子的正逆反应达到平衡状态所形成的电位差，是体系本身能量向最低状态转变的趋势所造成的。在平衡电位下，体系处于热力学平衡状态，电极上正、逆电化学反应的速度很小，其流过电极的电流称交换电流、净电流或者说外电流等于零，电极上没有外电流通过。实际电解和电解加工都工作在有外电源驱动的条件下，有比较大的外电流通过电极和电解池，这时，电极电位就会偏离平衡时的电位，这种现象称为极化。偏离平衡电位的数值称为过电位

$$\Delta E = E - E' \tag{4.1-3}$$

式中，ΔE 为过电位；E 为电极极化后的电位；E' 为平衡电位。

当外电流通过电极时，外电源从电解池的正极取走大量电子（外电流是从电源通过导线流向正极的），会使正极上失去电子的氧化反应大大加速，但无论怎样加速，单位时间内电化学反应产生的电子总供不上外电源从正极取走的电子，于是正极就会因缺电子而积累了多余的正电荷，致使正电极的电位向更正的方向偏移。因此接上外电源后电极电位会偏离平衡电位的原因是外力打破了原来的平衡状态，改变了双电层结构，对应的电位是极化后的电位。简而言之，由于电极反应本身的迟缓性，相对于外电流显得速度太小，造成了电极电位的偏移，这种极化称之为电化学极化。

除了因为电化学反应的迟缓性造成的电化学极化，还有其他原因也会引起电极极化，因为电极过程除了电化学反应外，还包括反应物来到电极表面和反应产物离开电极表面的扩散过程。以电解加工为例，采用氯化钠电解液，加工铁质工件，其电极过程及次级反应如下：

阳极过程 $Fe-2e \longrightarrow Fe^{2+}$

$Fe^{2+} \longrightarrow$ 水化离子

水化离子扩散离开电极表面并与水中氢氧根离子反应生成 $Fe(OH)_2$

阴极过程 电解质溶液中的水化氢离子 H_3O^{+} 向电极表面扩散

$H_3O^{+} \longrightarrow H_2O+H^{+}$ 水化氢离子脱离水分子

H^{+} 吸附到阴极表面

$H^+ + e \longrightarrow H$

$H + H \longrightarrow H_2$

H_2 脱附变成气泡逸出水面

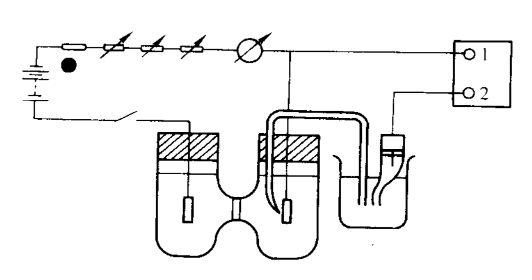
电极过程中各个单元步骤受到的阻力是不一样的，在一定大小的推动力（指外电源施加的电压）下，某个单元步骤的阻力越大，进行起来越困难，其速度就越慢。这里所说的速度，是假定其他单元步骤不存在的情况下，该步骤单独进行的速度。实际上这一连串的步骤是串联进行的，每个单元步骤的实际速度应该是相同的，实际上只能按最慢步骤的速度进行，这个最慢的步骤便称为速度控制步骤，其他某个速度快的单元步骤尽管蕴藏的反应能力大，却得不到发挥。如果电化学反应的速度足够快，而离子扩散的速度相对缓慢，那么这种电极过程的控制步骤是浓度扩散步骤，与电化学反应速度相比，溶液深处的反应物来不及扩散到电极表面，或者反应产物来不及向溶液深处扩散，电极表面的溶液浓度就会偏离溶液深处的浓度，这种由于扩散阻力造成的电位偏离平衡状态的现象称为浓差极化。就上述例子的阴极过程来说，阴极材料是铜，铜属于氢析出中的过电位金属，H^+ 在电极表面还原时很可能处于混合控制区，即电化学反应控制和扩散脱附步骤控制，反应过程会随着电极表面性质和条件的改变而改变。

总之，电极极化包括电化学极化和浓差极化，极化的结果使实际电极电位偏离平衡电位。电位偏离的大小取决于电极上通过电流的大小。

1.3.2　极化曲线

极化曲线是描述电流密度与电极电位之间关系的曲线，现在已经成为研究电极过程的有力工具。在电化学中为了各种目的都需要研究电极过程，需要了解某一个电流密度范围内电位随电流变化的规律。电解加工采用不同成分的电解液或不同类型的电源，会得到不同的加工精度，需要借助于极化曲线而研究电极过程与加工精度的关系。

极化曲线是针对具体的电极体系实际测量得到的，按照自变量的选择，可以分为控制电位法和控制电流法，按照某一规律（给定信号）改变电位（或电流），记录随之变化的电流（或电位），测量装置如图 4.1-6 所示。图 4.1-3 所示的极化曲线将阴极极化、阳极极化曲线表示在一张图面上，阳极（接电源的正极）发生极化的电位向正向偏移，称为阳极极化；阴极（接电源负极）发生极化时电位向负向偏移，称为阴极极化；对整个电解池来说，极化的结果使槽压增高。



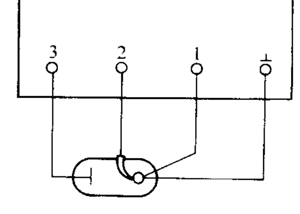


图 4.1-6　极化曲线测试装置示意图

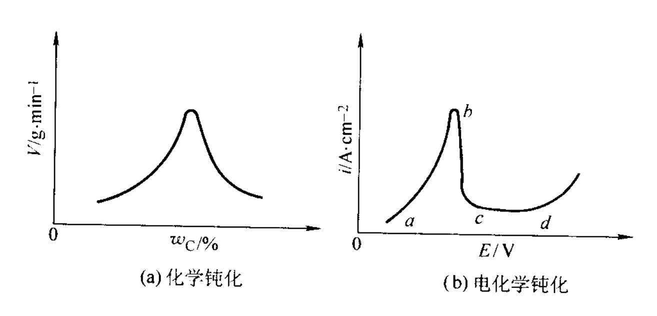
1—研究电极；2—参比电极；3—辅助电极

按照电极过程是否与时间因素有关，又可将测量方法分为稳态法和暂态法，比如阶跃法测量过程中控制间隔的长短，测得的极化曲线有稳态极化曲线和暂态极化曲线之分，稳态法是测定电极过程达到稳定状态后的电流密度与电极电位的关系，此时，电流密度和电极电位不再随时间改变，外电流就代表电极反应速度。因为稳态系统的条件是电流、电极电位、电极表面状态以及电极表面物种的浓度基本上不随时间改变，稳态的电流全部由电极反应产生，它代表着电极反应进行的净速度。暂态法测得的极化曲线包含时间因素对电极过程的影响。暂态测量法有电位扫描法（循环伏安法）、恒电流电解法、方波电位法、交流阻抗法等，暂态条件下上述电流、电位等参数可能随时间变化，流过电极/溶液界面的电流包括法拉第电流和非法拉第电流，暂态法拉第电流由电极/溶液界面的电荷传递产生，可以计算电极反应的量；暂态非法拉第电流由双电层的结构改变引起，可以研究电极表面的吸附和脱附行为等。目前在电解加工中已经开展的极化曲线测量尚局限于稳态极化曲线，如何采用暂态的测量方法揭示电解加工的电极过程机理是一个有价值的研究课题。

1.3.3　阳极钝化和过钝化

虽然铁在稀硝酸中会很快溶解，但用铁制容器却可以用来盛浓硝酸，这是因为铁的溶解速度 V 随硝酸浓度的改变而变化（参见图 4.1-7a）；在高浓度区，浓硝酸是强氧化剂，会在铁表面生成一层氧化膜，使铁钝化而不发生溶解，这就是化学钝化的典型事例。

与化学钝化中的浓度变化相类似，铁在硝酸钠电解质溶液中会发生电化学钝化，当阳极电位从低变高时，存在这样一个临界值，如果达到这个值后再继续增加电位，电流不但不增加，反而急剧下降，这种现象称为电化学阳极钝化。阳极钝化也可以用如图 4.1-7b 所示的极化曲线进行描述。b 点之前，电流随电压提高而增加，至 b 点后，突然急转直下（bc 段），再提高电位，电流基本维持在与 c 点相当的电流值，此时，阳极溶解受到阻滞，即发生阳极钝化，对应 cd 段的电流被称为维钝电流。关于引起钝化的原因有两种理论：成相膜理论认为，在该电位下，溶液和金属之间发生反应，生成一层氧化膜，阻滞了金属的进一步溶解；吸附理论认为，溶液中的某些粒子吸附到金属上的某些活性点，使金属失去活性。图 4.1-7b 所示曲线从 d 点后，随电位升高，电流迅速增加，阳极溶解速度加快。这是因为阳极极化电位达到了另一种元素的电化学反应的电位，比如达到了氧气的析出电位，氧气的析出使钝化膜破裂，金属再度加速溶解，这一阶段称为过钝化或过钝化溶解。



(a) 化学钝化　　(b) 电化学钝化

图 4.1-7　钝化曲线示意图

由上述阳极钝化和过钝化现象可知，钝化也是电化学极化的一种，它是电化学反应被阻滞而造成的。由于阳极钝化，可以使某种电极反应的电位向正向移动很多，结果改变

了电解池中按平衡电位排序的顺序，而可能在电极上产生另外元素的电化学反应。

钝化现象的利弊作用要视具体情况而定：对电镀和电解精炼铜需要防止阳极钝化，才能使生产顺利进行；而作为防腐蚀的一种手段，又往往需要利用钝化现象来进行阳极保护，钝化反而变得有利。电解加工中的非线性电解液也是利用其钝化作用而使非加工面或已加工面得到保护，而加工却在过钝化区发生，从而使加工精度得到提高。对钝化作用的研究就是围绕着如何扬其长避其短这一中心而展开的。

1.3.4　实际电解加工电极反应的顺序

电解加工中，为了获得高生产率，所使用的电流密度一般都比较高，都会引起极化，所以在电极上实际进行的反应就不可能仅仅取决于平衡电位的高低，而是取决于极化后电极实际电位的高低。比如在14%～18%氯化钠电解液中进行电解加工时，由于氯化钠和水的离解而产生

$$NaCl \longrightarrow Na^+ + Cl^-$$
$$H_2O \longrightarrow H^+ + OH^-$$

溶液中存在 Na^+、Cl^-、H^+、OH^- 等离子，通电时，Na^+ 和 H^+ 向阴极迁移，Cl^- 和 OH^- 向阳极迁移。加工铁工件时，工件阳极可能发生的反应有：

$$Fe - 2e \longrightarrow Fe^{2+} \qquad E^\circ = -0.44\ V$$
$$Fe - 3e \longrightarrow Fe^{3+} \qquad E^\circ = -0.036\ V$$
$$4OH^- - 4e \longrightarrow O_2 + 2H_2O \qquad E^\circ = +0.401\ V$$
$$2Cl^- - 2e \longrightarrow Cl_2 \qquad E^\circ = +1.358\ V$$

工具阴极可能发生的反应有：

$$2H^+ + 2e \longrightarrow H_2 \qquad E^\circ = 0\ V$$
$$Na^+ + e \longrightarrow Na \qquad E^\circ = -2.713\ V$$

纯铁在活性氯化钠水溶液中，铁原子失去电子变成二价铁离子，其电化学极化很小，如果铁的表面光滑，则不可能有 Cl^- 和 OH^- 离子的放电反应；在阴极，钠的放电电位远远低于氢的析出电位，如果阴极材料为黄铜，由于氯化钠电解液中没有铜离子，则不可能发生铜的析出；对于氢放电来说，铜属于中过电位金属，电化学极化不大，扩散和脱附阻力也不大；因此，在氯化钠电解液中电解加工纯铁时，阳极主要是二价铁的溶解，阴极是氢气析出，按照平衡电位的大小决定反应的顺序也符合实际情况。

然而实际工件往往不是纯铁，而是钢，一般的钢材都是铁碳合金，是复杂的、不均匀的多相体，因此，电极表面从微观来看处处电位不相等，Cl^- 和 OH^- 离子就有可能在电位较正的渗碳体表面放电，并且加工前一般工件阳极的表面粗糙度较大，也提供了析出气体的条件，因为表面粗糙，凸峰处和凹陷处的钝化程度不同，凸峰处电位较负，金属铁得以溶解，而凹陷处电位较正，气体就容易在此处析出。从放电的平衡电位来看，OH^- 比 Cl^- 的放电电位负，应当析出氧气，但是析氧的过电位比析氯的过电位高，实际上是先析出氯气，当电流密度继续增高时，可能还会析出氧气。

钢质工件在硝酸钠电解液中进行电解加工时，虽然阳极上可能进行的反应与在氯化钠电解液中相同，即

$$Fe - 2e \longrightarrow Fe^{2+} \qquad E^\circ = -0.59\ V$$
$$Fe - 3e \longrightarrow Fe^{3+} \qquad E^\circ = -0.036\ V$$
$$4OH^- - 4e \longrightarrow O_2 + 2H_2O \qquad E^\circ = +0.401\ V$$

按照平衡电位的大小，在阳极应优先生成二价铁，而不会同时发生三价铁的反应，但是因为硝酸钠电解液是一种钝性电解液，为了提高加工精度，实际生产中控制的电压已达到铁的过钝化溶解电位和氧的析出电位，因此，电极上实际同时发生了上述三种反应。

1.3.5　电解加工的电极过程实例

电极过程包括电极反应及其反应前后的传质过程、次级反应等，仅以钢、铜、硬质合金为例介绍电解加工的电极过程。

1）在氯化钠电解液中加工钢工件

① 反应粒子的迁移　在氯化钠电解液中，存在 Na^+、Cl^-、H^+、OH^- 四种离子，通电时，Na^+ 和 H^+ 向阴极迁移，Cl^- 和 OH^- 向阳极迁移。

② 电极反应　阳极进行的主要电化学反应为

$$Fe - 2e \longrightarrow Fe^{2+}$$

可能同时进行的反应（称为副反应）有

$$2Cl^- - 2e \longrightarrow Cl_2$$
$$4OH^- - 4e \longrightarrow O_2 + 2H_2O$$

阴极进行的是氢气的析出

$$2H^+ + 2e \longrightarrow H_2$$

③ 反应产物的扩散和次级反应　阳极溶解下来的二价铁离子从电极表面向溶液深处扩散，与溶液中水电离生成的氢氧根离子结合生成墨绿色的氢氧化亚铁絮状沉淀：

$$Fe^{2+} + 2OH = Fe(OH)_2 \downarrow$$

随着高速流过的电解液带离加工区，遇到溶液中溶解的氧或者排出后遇到空气中的氧，生成红棕色的氢氧化铁：

$$4Fe(OH)_2 + 2H_2O + O_2 = 4Fe(OH)_3 \downarrow$$

这个反应称为电极过程后的次级反应。

2）钢在氯酸钠电解液中的电极过程

① 反应粒子的迁移　氯酸钠也是强电解质，几乎百分之百地电离，则电解液中有四种离子，其中 ClO_3^-、OH^- 向阳极迁移，Na^+、H^+ 向阴极迁移。此外，电极反应和次级反应的产物中有氯离子，Cl^- 也会向阳极迁移。

② 电极反应　氯酸钠电解液是钝性电解液，真正加工发生在过钝化区，因此阳极电化学反应为二价和三价铁离子同时生成：

$$Fe - 2e \longrightarrow Fe^{2+}$$
$$Fe - 3e \longrightarrow Fe^{3+}$$

副反应有氧气析出：

$$4OH^- - 4e \longrightarrow O_2 + 2H_2O$$

阴极是氢气析出：

$$2H^+ + 2e \longrightarrow H_2$$

③ 次级反应　在氯酸钠电解液中，氯酸根与水结合生成氯离子和氢氧根离子：

$$Fe^{2+} + ClO_3^- + 3H_2O + 6e = Fe^{2+} + Cl^- + 6OH^-$$
$$Fe^{3+} + ClO_3^- + 3H_2O + 6e = Fe^{3+} + Cl^- + 6OH^-$$

3）以氯化钠电解加工硬质合金的电极过程。

在氯化钠电解液的基础上加入5%～10%氢氧化钠和5%酒石酸，或者10%三乙醇胺。增强溶液的碱性主要是为了溶解硬质合金中的钴、钨，酒石酸、三乙醇胺是添加剂，起络合作用，以防止已溶解下来的反应产物重新沉积到电极表面上。

① 反应粒子的迁移　该溶液中向阳极迁移的粒子有 OH^-、Cl^- 以及酒石酸根，向阴极迁移的有 Na^+ 和 H^+。

② 电极反应　阳极硬质合金工件中的黏结剂钴首先在碱性介质中溶解并失去电子，与迁移来的氢氧根离子结合：

$$Co - 2e = Co^{2+}$$
$$Co^{2+} + 2OH = Co(OH)_2$$

另一部分氢氧根离子到电极上放电：

$$2OH^- - 2e = H_2O + [O]$$

所生成的初生态氧［O］一部分吸附到钴溶解后在硬质合金工件留下的微孔中，将硬质合金基体中的碳化钨、碳化钛氧化：

$$WC + 4[O] = WO_3 + CO$$
$$TiC + 3[O] = TiO_2 + CO$$

另一部分初生态氧［O］复合生成氧气，在电极上

析出：

$$2[O] = O_2 \uparrow$$

③ 产物扩散及次级反应　阳极反应所生成的氧化钨、氧化钛离开电极表面与溶液中的氢氧化钠作用生成盐：

$$WO_3 + 2NaOH = Na_2WO_4 + H_2O$$

进一步，酒石酸对钨酸盐、钛酸盐以及钴离子进行络合，保证了阳极的正常溶解和电解液的净化。

如果使用单一的氯化钠来加工硬质合金，WO_3、TiO_2 以及 $Co(OH)_2$ 都会在阳极表面生成一层黑膜，妨碍阳极的进一步溶解。

4) 加工黄铜的电极过程　加工黄铜用的电解液是 20% 的氯化铵或 15% 的硝酸钠，也可以在氯化铵溶液中加 5% 的醋酸钠。因为黄铜含铜和锌，为了保证加工顺利进行，可以采取络合的方法使电极反应生成的简单铜离子、锌离子变成络离子，现就氯化铵电解液来讨论它的电极过程。

① 反应粒子的迁移　由于氯化铵在水中会水解：

$$NH_4Cl + H_2O = NH_4OH + HCl$$

生成的氢氧化铵进一步分解：

$$NH_4OH = NH_3 + H_2O$$

因此，向两极迁移的粒子除了 OH^-、Cl^-、H^+、NH_4^+ 外，还有 NH_3，它是一种络合剂，会将电极反应溶解下来的金属离子在加工区就络合，从而使反应正常进行。

② 电极反应　阳极上的反应有

$$Zn - 2e = Zn^{2+}$$

$$Cu - 2e = Cu^{2+}$$

$$Cu - e = Cu^{+}$$

$$4OH^- - 4e = O_2 + 2H_2O$$

阴极反应为

$$2H^+ + 2e = H_2$$

③ 产物扩散和次级反应　阳极溶解下来的金属离子被溶液中的 NH_3 络合生成络离子：

$$Zn + 4NH_3 = Zn(NH_3)_4^{2+}$$

$$Cu + 2NH_3 = Cu(NH_3)_2^{+}$$

$$Cu + 4NH_3 = Cu(NH_3)_4^{2+}$$

1.4　电解去除量的计算——法拉第定律和电流效率

法拉第（Faraday）定律是电化学加工过程所遵循的最基本规律，是人们认识电解加工，进行电解加工生产的理论基础。电解加工工件尺寸由加工参数控制，一般可以基于法拉第定律，根据已知条件，按照体积去除量计算应给定的加工参数；也可以根据预先选定的加工参数计算加工尺寸，加工后对零件尺寸进行测量、比较，然后再对加工参数、加工条件作某些修正。法拉第定律对设定加工参数或预测加工尺寸均有指导意义。

1.4.1　法拉第定律

对电极溶液界面上发生的过程，法拉第首先发现：

① 电极界面上发生的电化学反应的物质的量与所通过的电量成正比。此即法拉第第一定律。

② 当相同电量通过不同电极界面时，电极上析出或溶解的物质的量与其电化学当量成正比，或者说，当界面上有 1 mol 的任何物质发生反应时，它们消耗的电量是相等的。此即法拉第第二定律。

法拉第定律描述了在电极界面上发生反应元素的质量与通过电量之间的关系。

$$W = kQ = kIt \tag{4.1-4}$$

式中，W 为发生反应元素的质量，g；Q 为通过电极界面的电量，A·s 或 A·min 或 A·h；I 为电流，A；t 为电流流过的时间，s 或 min；k 为质量电化当量，g/（A·s）或 g/（A·min）。

质量电化当量就是通过单位电量所能进行反应的某种物质的质量，这里说的"单位电量"，可以是 1 库仑（A·s）、1 安时（A·h）、或 1 法拉第（A·s/mol）。1 法拉第电量正好是使 1 克当量物质反应所需的电量，通过实验求出，等于 96 500 C（库仑），用字母 F 表示，称为法拉第常数：

$$F = 96\,500\ (\text{A·s/mol}) \approx 1\,608.3\ (\text{A·min/mol}) \approx 26.8\ (\text{A·h/mol})$$

因此，每种元素的电化当量可以由其原子量 A 及法拉第常数 F 来求得：

$$k = \frac{A}{nF} \tag{4.1-5}$$

式中，n 为原子价。

比如铁在氯化钠水溶液中以二价状态溶解，其电化当量则为

$$k = \frac{A}{nF} = \frac{55.85}{2 \times 26.8} = 1.042\ \text{g/(A·h)}$$

在电解加工时，最终要保证的是零件的尺寸，按质量计算、表示都不方便，因此又引出体积电化当量，以便于按体积计算发生反应元素的体积。

$$V = \frac{W}{\rho} = \frac{1}{\rho}kIt = \omega It \tag{4.1-6}$$

式中，ρ 为发生反应元素的密度，g/cm³；V 为发生反应元素的体积，cm³；ω 为体积电化当量，cm³/（A·s）或 cm³/（A·min）。

一些常用金属的体积电化当量列于表 4.1-3。

电解加工中，工件材料多为合金，其质量电化当量和体积电化当量可以按下式计算：

$$k = \frac{1}{F\left(\frac{n_1}{A_1}a_1 + \frac{n_2}{A_2}a_2 + \cdots + \frac{n_j}{A_j}a_j\right)} \tag{4.1-7}$$

$$\omega = \frac{1}{\rho F\left(\frac{n_1}{A_1}a_1 + \frac{n_2}{A_2}a_2 + \cdots + \frac{n_j}{A_j}a_j\right)} \tag{4.1-8}$$

式中注脚 1，2，…，j 表示第 j 种元素，a_j 表示在整个合金中（100%）第 j 种元素所占的百分比，其余符号意义同式（4.1-4）～式（4.1-6）。

部分常用合金的体积电化当量列于表 4.1-4。对合金，同样 $\omega = k/\rho$ 成立。

1.4.2　电流效率

法拉第定律是自然科学中最严格的定律之一，但在电解加工生产中发现被加工掉的金属量有时不符合按上述公式计算得到的值。这并不是因为法拉第定律有什么例外，而是因为电极上发生了副反应或产生了机械剥落。副反应的发生消耗了一部分电量，使实际被加工金属小于按公式计算的值；机械剥落常因材料组织不均匀造成，它使实际金属蚀除量大于按公式计算的值；还有可能是因为金属以几个化合价溶解，理论计算时采用的化合价低于或高于实际溶解的化合价，也会导致理论计算值偏离实际加工结果。为此，引入电流效率 η 的概念：

$$\eta = \frac{\text{实际反应物量}}{\text{理论计算的物量}}$$

于是式（4.1-4）和式（4.1-6）可改写为

$$W = \eta kIt \tag{4.1-9}$$

$$V = \eta\omega It \tag{4.1-10}$$



表 4.1-3　部分金属的电化当量

金属	相对原子质量 A	原子价 n	密度 $\rho/g\cdot cm^{-3}$	质量电化当量 $k/g\cdot(A\cdot min)^{-1}$	体积电化当量 $\omega/cm^3\cdot(A\cdot min)^{-1}$
Fe	55.85	2	7.80	0.017 4	0.002 2
Fe	55.85	3	7.80	0.011 6	0.001 5
Co	58.94	2	8.86	0.018 6	0.002 1
Co	58.94	3	8.86	0.012	0.001 4
Ni	58.69	2	8.60	0.018 3	0.002 1
Ni	58.69	3	8.60	0.012 0	0.001 4
Al	26.98	3	2.71	0.005 6	0.002 1
Zn	65.38	2	7.14	0.019 9	0.002 8
Cr	52.01	3	7.16	0.010 7	0.001 5
Cr	52.01	6	7.16	0.005 7	0.000 8
W	183.92	6	19.2	0.018 6	0.001 2
Mg	24.32	2	1.74	0.007 6	0.004 4
Mn	54.94	2	7.40	0.017 0	0.002 3
Mn	54.94	4	7.40	0.008 8	0.001 2
Cu	63.57	2	8.93	0.019 8	0.002 2
Cu	63.57	1	8.93	0.039 5	0.004 4
Mo	95.69	4	10.2	0.015 3	0.001 5
Mo	95.69	6	10.2	0.010 0	0.001 0
Pb	207.2	4	11.0	0.032 2	0.002 9
Pb	207.2	2	11.0	0.064 4	0.005 9
Ti	47.9	4	4.5	0.007 6	0.001 7
V	50.94	5	5.96	0.006 3	0.001 0
Si	28.08	4	1.42	0.004 4	0.003 1

表 4.1-4　部分合金体积电化当量

牌号	密度 $\rho/g\cdot cm^{-3}$	体积电化当量 $\omega/cm^3\cdot(A\cdot min)^{-1}$	牌号	密度 $\rho/g\cdot cm^{-3}$	体积电化当量 $\omega/cm^3\cdot(A\cdot min)^{-1}$
GH33（ЭИ437Б）	7.85	0.002 1	LY11	2.8	0.002
GH37（ЭИ617）	7.8	0.002	LY9		0.002 2
（ЭИ598）		0.001 9	TC6	4.5	0.002 1
（ФН62BMKЮ）	7.85	0.002 1	TC8		
5CrNiMo	7.8	0.002 2	TC9		
1Cr18Ni9Ti	7.9	0.002 1	TC2	4.55	0.002 6
30CrMnSiA	7.85	0.002 2	（BT16）	4.68	0.002 3
30CrMnSiNiA	7.77		（BT20）	4.45	0.002 2
38Ni	7.71		（BT22）	4.5	0.002 3
38Ni	7.75	0.002	（BK8）	14.35	0.001 3
2Cr13	7.75	0.002 1	（T15K6）	11	0.001 5
（ЭИ893）	8.8	0.001 8	（T5K10）	12.2	

注：表中带括号的牌号为前苏联标准。

1.4.3　利用法拉第定律计算加工参数的实例

在生产中使用法拉第定律计算加工参数是一种简捷的方法，特别是对于新研制的产品，设定加工参数更需要有计算的依据，常常先选定进给速度，代入相关公式计算加工电流。以炮管内孔和膛线电解加工为例，比如要加工某炮管，其膛线为 12 条，阴线直径为 $\phi30^{+0.03}_{0}$ mm，线宽（4±0.05）mm，深 0.5 mm，阳线 $\phi29^{+0.03}_{0}$ mm，（导程及其他参数略），选定加工速度 120 mm/min，对于不同的加工对象，由于材料和热处



理规范不同，$\eta\omega$ 值不同，一般由试验确定，对于该炮管材料，以 2.3 mm³/（A·min）代入，估算加工电流如下：

据 $V=\eta\omega I t$，则有

$I = V/\eta\omega t = SL/\eta\omega t = Sv/\eta\omega = (4\times0.5\times12)\times120/2.3 = 1\ 252\ \text{A}$

式中，t 为加工时间，min；S 为加工面积，mm²，v 为进给速度，mm/min。

其余符号的意义前已述。

1.5　加工间隙的形成及其对电解加工成形的决定作用

1.5.1　电解加工间隙的形成

电解加工是一种非接触式加工，加工过程中阴极和阳极之间的距离称作加工间隙，至加工结束时，工件的形状和尺寸就是以阴极形状或者以阴极加工刃边运动所形成的包络面为基础，并考虑最终加工间隙而得到的拷贝式加工或展成式加工的工件形状和尺寸。

实际加工时，初始间隙预先设定，加工开始后阴极向阳极送进，阳极按一定的速度溶解，底部间隙逐步趋近于某一稳定值（称作平衡间隙），也可能还没达到平衡间隙就到了规定的加工深度而结束了加工。所谓电解加工间隙的形成是指在初始间隙的基础上，不断进行电化学阳极溶解而加工间隙的逐渐变化并逐渐达到平衡加工间隙、或在加工结束时达到最终间隙的过程。

1.5.2　加工间隙对电解加工成形精度的决定作用

由电解加工阴极、工件及其加工间隙几何结构（参见图 4.1-8）可知，由于整个电解加工过程工具阴极的几何形状和尺寸都不会改变，则加工间隙的大小及几何分布、即加工间隙的空间（x，y，z）、时间（t）分布 [$\Delta=\Delta(x,y,z,t)$]，将直接决定了所加工工件的几何形状和尺寸（参见图 4.1-8）。就是说，加工间隙对电解加工成形精度起着最终决定作用。

有关加工间隙的计算、影响因素及其对加工精度的影响，将在第 2 章专题论述。

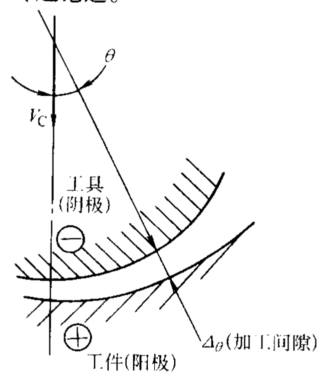


图 4.1-8　工具阴极、工件及其加工间隙的几何结构模型

2　电解加工间隙中的电场特性

在电解加工过程中，工具阴极和工件阳极之间充满着高速流动的电解液，由于外加电源电压施加于两极，流经两极间隙的电解液中有相应的电流通过，从而在间隙电解液中形成了一个电流场，其电位、电流密度的时间、空间分布直接影响电解加工的速度和成形精度。本节将重点分析电解加工间隙电场中的电位、电流分布及其对电解加工成形规律的影响。

2.1　电场的物理描述

电场是物质的一种特定形态，因而同样具有能量、动量和质量。研究电场问题，就是研究电场的物理结构特点及有关电场参数的分布。按照电场存在的形式不同，一般可将其分为：静电场、导电媒质中的电场和有电流通过的导电媒质中的电场，其中静电场是研究一般电场问题的基础，而电解加工间隙中存在的电场则属于导电媒质中的电场这一类型，故以下着重讨论这两类电场的基本物理描述。

2.1.1　静电场

静电场是由相对于观察者静止不动且带电体上不增减的电荷所形成的电场。静电场对外的主要表现包括：①静电场能对引入场中的任何带电体施力；②静电场能使引入其中的导体或电介质分别产生静电感应现象或极化现象；③静电场具有能量，当带电体在电场中移动时，电场的作用力将对其作功。

为了对静电场进行描述，定义了电场强度、电位梯度、电力线和等位面等有关电场特征的重要物理参数。

1）电场强度和电位梯度　电场强度用以描述电场对电荷的作用力，定义为单位正电荷在该点处所受的力。如果将试验正电荷 q 引入电场中某点，设其在该处所受电场力为 $\boldsymbol{F}$，则该点处电场强度 $\boldsymbol{E}$ 可表示为

$$\boldsymbol{E}=\frac{\boldsymbol{F}}{q} \tag{4.1-11}$$

由上式可知，电场强度 $\boldsymbol{E}$ 为矢量，其大小及方向与单位正电荷在该处所受电场力的大小与方向完全相同。

电位梯度则是描述电场中沿着某一方向的电位变化率。电场中某点的电位梯度是一矢量，其方向沿着该点处电位增加率最大的方向，大小等于沿该方向上的电位增加率。如图 4.1-9 所示，设 P_1 点处的电位为 ϕ，$\boldsymbol{n}$ 为 P_1 点处电位梯度方向上的单位矢量，则 P_1 点处电位梯度就是电位由 P_1 到 P_2 的变化率，即

$$\text{grad}\phi=(\text{d}\phi/\text{d}n)\,\boldsymbol{n}$$

已经证明，在电场中各点的电场强度 $\boldsymbol{E}$ 等于该点电位梯度的负值，即

$$\boldsymbol{E}=-\frac{\text{d}\phi}{\text{d}n}\boldsymbol{n} \tag{4.1-12}$$

设 $\text{d}n$ 在直角坐标系 $O-xyz$ 各轴上的投影分别为 $\text{d}x$、$\text{d}y$、$\text{d}z$，x、y、z 轴的单位矢量分别为 $\boldsymbol{e}_x$、$\boldsymbol{e}_y$、$\boldsymbol{e}_z$，则电场强度 $\boldsymbol{E}$ 可表示为

$$\boldsymbol{E}=-\left(\frac{\partial\phi}{\partial x}e_x+\frac{\partial\phi}{\partial y}e_y+\frac{\partial\phi}{\partial z}e_z\right) \tag{4.1-13}$$

$\boldsymbol{E}$ 在各轴上的分量 $\boldsymbol{E}_x$、$\boldsymbol{E}_y$、$\boldsymbol{E}_z$ 可表达为

$$\boldsymbol{E}_x=-\frac{\partial\phi}{\partial x}\boldsymbol{e}_x;\ \boldsymbol{E}_y=-\frac{\partial\phi}{\partial y}\boldsymbol{e}_y;\ \boldsymbol{E}_z=-\frac{\partial\phi}{\partial z}\boldsymbol{e}_z \tag{4.1-14}$$

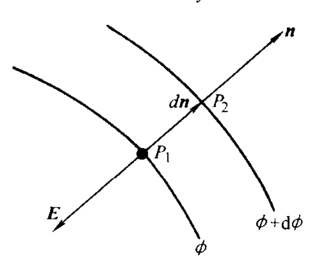


图 4.1-9　电位梯度与电场强度的关系

2）电力线和等位面　为了形象地表达电场，引入电力线和等位面两个特征几何量。

所谓电力线，是人为地在电场中画出的、用以描述电场强度的一系列曲线，这些曲线上每一点的切线方向都与该点处电场强度方向一致，而该点处电力线的疏密程度则与该点处电场强度大小成正比，即场强越高，电力线越密。引入电力线后，可便于形象理解静电场所具有的规律，从电场的电力线分布图形中，可以得到静电场的两个重要特点：其一，

电力线起自正电荷，止于负电荷。其二，电力线不会形成闭合回线，它不是旋涡矢量线，因此静电场为无旋场。另外由于静电场中任何一点的电场强度都只有一个方向，故任意两条电力线都不会相交，如图 4.1-10 所示。

等位面用来描绘电场中各点的电位。一般说来，静电场中各点电位逐点变化，但是电场中有许多电位相等的点，这些电位相等的点构成的面称为等位面。将电力线与等位面画在一起，可以发现：任何带电系统所产生的静电场中，电力线与等位面都是处处正交，而且电力线的方向，即电场强度的方向总是指向电位降低的方向。图 4.1-10 给出了不同形式静电场中的电力线（实线表示）和等位面（虚线表示）。

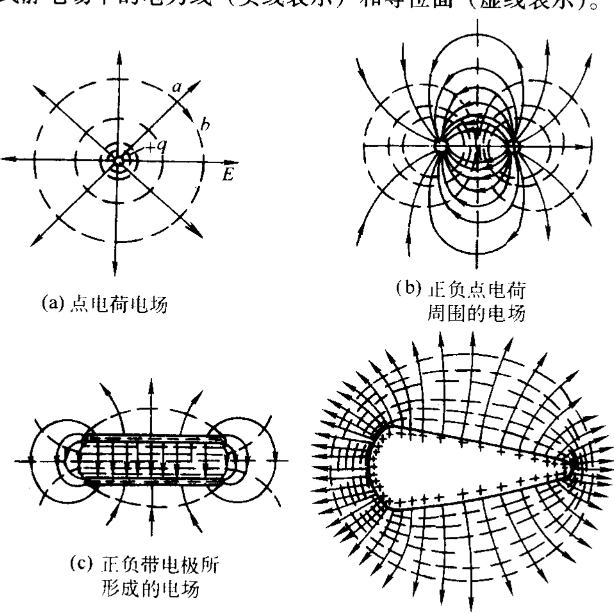


图 4.1-10　不同形式静电场中的电力线与等位面

2.1.2　导电媒质中的电场

导电媒质的主要特征是媒质的电导率 $\kappa > 0$，故当媒质内有电场存在时，就会有电流流动，为了描述电流场的分布，定义了电流密度 $\boldsymbol{i}$，即电场中某点的电流密度在数值上等于过该点并与电流方向垂直的单位面积上的电流，方向与电场强度 $\boldsymbol{E}$ 相同，即指向电位降低的方向。$\boldsymbol{i}$ 与电场强度 $\boldsymbol{E}$ 和电导率 κ 的关系为

$$\boldsymbol{i} = \kappa \boldsymbol{E} \tag{4.1-15}$$

在静电学中，为了形象地描述静电场中的电场强度和电位，曾引入电力线和等位面。同样，为了对导电媒质中的电场进行直观的几何描述，可引入电流线（类似于静电场中的电力线）和等位面。规定电流线是这样的有向曲线：其上任一点的切线方向与该点的电流密度方向相同，而等位面仍是由电位相等的点构成的面。与静电场类似，电场中各点的电流线总是与通过该点的等位面正交，而电流线正向指向电位降低的方向。

根据一般电学理论，要维持导电媒质中有恒定电流流动，则导电媒质必须与外加电源相连，或者说有外加电动势驱动才能保持电流不断流动。对于所研究的电场，如果包括外加电源，则称为有源电场；如果不含外加电源，则称为无源电场。

2.2　电解加工间隙中的电场分布

在电解加工过程中，由于电场的作用，电解液中的正离子向工具阴极移动，负离子向工件阳极移动，形成了从工件阳极流向工具阴极的电流，从而构成了电流场。考虑到电解加工所用的电源是在所研究的间隙电场之外，为便于研究，可将电解液中的电场看作无源电场；再考虑到研究电解加工成形规律时一般认为电解加工过程已进入平衡状态，此时电场参数不再随时间变化，而只是空间位置的函数，即间隙电场属于稳恒电流场。因此可将本节所论及的电解加工间隙中的电场视作为无源导电媒质中的电场进行研究。若又假设电解液各向同性（这也比较接近实际），则由电场理论可知，该电场的电位分布符合拉普拉斯方程，即

$$\nabla^2 \phi = 0$$

或写作

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0$$

该电场的电场强度 $\boldsymbol{E}$ 符合式（4.1-11），而电流密度 $\boldsymbol{i}$ 符合式（4.1-15）。对于阴极和阳极表面上的电位分布，由于工具阴极和工件阳极为金属导体，故可将阴极表面和阳极表面视为不同电位的等位面，设阳极表面的电位为 $\phi_a = U$，阴极表面上的电位为 $\phi_c = 0$。

当电解加工达到平衡状态时，根据欧姆定律和法拉第电解定律可建立有关工件电解速度（工件被加工表面的法向腐蚀速度）的基本方程

$$v_a = \eta \omega i$$

设阴极垂直送进速度为 v，则有

$$v_a = v\cos\theta$$

式中 θ 为阳极某处电解面的法向与阴极送进速度 v 的夹角，如图 4.1-11 所示。上式的实用范围是 $0° \leqslant \theta \leqslant 45°$，当 $\theta > 45°$ 以后，误差将急剧增大而不再适用。当 $\theta = 0$ 时，即阳极电解面与阴极送进速度垂直，若用 v_{a0}，η_0 和 i_0 分别表示 $\theta = 0$ 的 v_a，η 和 i，并假设各处的 ω 相同，则有

$$v_{a0} = v = \eta_0 \omega i_0$$

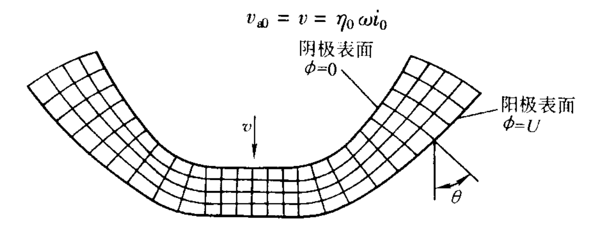


图 4.1-11　电解加工间隙中的电场分布

若只考虑 $\boldsymbol{i}$、$\boldsymbol{E}$ 的量值而不考虑其方向，则由式（4.1-11）和式（4.1-15）可得 $i = \kappa\ (\partial\phi/\partial n)$。由以上各有关式，可推导出沿阳极表面各处法向的电位变化率：

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = \frac{\eta_0}{\eta} \times \frac{i_0}{\kappa}\cos\theta \tag{4.1-16}$$

归纳上述各式，可以得到如下描述电解加工间隙中电位分布的数学模型方程组：

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \tag{4.1-17}$$

阳极表面边界条件：

$$\begin{cases} \phi_a = U \\ \dfrac{\partial \phi}{\partial n} = \dfrac{\eta_0}{\eta} \times \dfrac{i_0}{\kappa}\cos\theta \end{cases} \tag{4.1-18}$$

阴极表面边界条件：

$$\phi_c = 0 \tag{4.1-19}$$

以上方程组中，ϕ 为电场中各点的电位，一般地，$\phi = \phi(x, y, z)$；U 为阳极表面电位值；n 为阳极表面各处的法向坐标；θ 为阴极送进速度与阳极表面法向之间的夹角；η 为电流效率，一般地，$\eta = \eta(i)$；η_0 为 $\theta = 0$ 处的 η；i 为电流密度，一般认为，间隙中沿阳极表面同一法线上各点的 i 相同，故可写作 $i = i(\theta)$；i_0 为 $\theta = 0$ 处阳极表面法向上的电流密度；κ 为电解液的电导率，一般地，受电解液浓度、温



度和电解液中气泡率的影响。

在图 4.1-11 中，大致地绘出了电流线和等位面，以此形象地描述间隙电场中的电位与电流密度分布。

2.3 基于电场分布的电解加工成形规律研究

在电解加工生产实践中，首先需要解决的是工具阴极的设计问题，这直接关系到零件的加工质量，要设计出正确的阴极，必须有可靠的理论作指导，这个理论的核心部分通常称为电解加工的成形规律，它反映的是电解加工间隙随加工时间（t）、空间（x，y，z）的分布，可记为 Δ（x，y，z，t），若加工进入平衡状态，则 Δ 不再随时间 t 变化，记作 Δ（x，y，z）。影响成形规律的因素很多，如电场，电解液的流场、温度场、成分、浓度，电极的极化、加工工件的材料等，但其中电场是起决定作用的因素。因为成形规律的本质问题是：求出加工过程中阳极表面上任一点、任一瞬时的电解速度。根据法拉第电解定律，工件表面的电解速度与电流密度成正比，而电流密度在工件表面和阴极间的分布状况的研究属电场理论问题。因此在进行成形规律研究时，通常把成形规律归结为描述电场强度、电流线矢量的时空分布，认为加工间隙矢量就是电流线矢量，即认为电流线的空间位置、长度就是加工间隙的空间位置和长度。考虑到加工间隙分布规律求解的难度，为了使问题简化而又不失其求解精度，可以在先简化的基础上进行分析求解，然后再逐项考虑多项因素的影响进行修正。基于电场分布来分析电解加工的成形规律是设计工具阴极的主要处理方法。

2.3.1 简化电场、近似处理的成形规律研究

在电解加工实际应用和研究中，为使问题简化而又能满足实际生产需要，常采用近似研究的方法，最典型的是 $\cos\theta$ 法。它是在基于如下简化电场的假设条件下进行研究的：

1）欧姆定律在阳极表面、阴极表面以及整个加工间隙电解液中都成立；

2）工具阴极和工件阳极表面为不同电位值的等位面；

3）金属阳极溶解过程的电流效率 η 在加工零件表面所有区段都是一样的（对 NaCl 电解液在任何电流密度条件下可取 η 为常数；对 $NaNO_3$ 电解液在高于一定的电流密度条件下 η 可近似为常数）；

4）同一电流线上的电解液电导率 κ 相同。

在上述假设条件下，电解加工间隙的物理意义就是电流线的长度，所以电解加工间隙的计算也就转化成了电流线长度的计算问题。由于实际电流线大都是空间曲线，由阳极表面上各点的法向开始，到阴极表面上相应点法向进入而结束（如图 4.1-12 中的曲线 AA'）。考虑到这种实际曲线的电流线矢量计算工作量太大，且考虑到电解加工间隙很小（一般处于 10^{-1} mm 数量级），则在阳极表面法向与阴极表面法向夹角不大的情况下，对于阴极表面上 A 点的间隙，可以用垂直阴极表面的直线长度 AA'_1 或垂直于阳极表面的直线长度 AA'_2 来代替，从而简化加工间隙的计算。

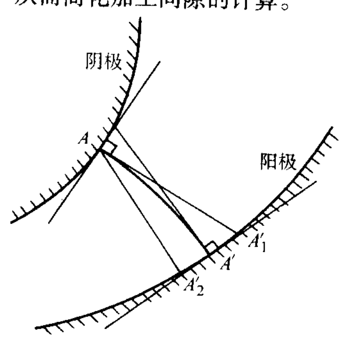


图 4.1-12　电流线的近似计算

基于上述简化电场的假设条件及电流线长度计算的近似处理，根据欧姆定律和法拉第电解定律，参照图 4.1-13，可建立加工间隙的基本方程：

$$\Delta_\theta = \eta\omega\kappa\frac{U-\delta E}{v_{a\theta}} = \frac{C}{v_{a\theta}} \tag{4.1-20}$$

式中，$v_{a\theta}$ 为工件在 θ 处的电解速度，mm/min；Δ_θ 为 θ 处的法向平衡加工间隙，mm；U 为阴、阳极之间的电压，V；δE 为阴、阳极极化电位值总和，或近似为分解电压，V；κ 为电解液电导率，1/（Ω·mm）；ω 为体积电化当量，mm^3/（A·min）；η 为电流效率；$C=\eta\omega\kappa$（$U-\delta E$），通常可认为其为常数，mm^2/min。

式（4.1-20）为一双曲线，体现了电解速度与间隙的双曲线规律，它是成形规律分析中的基本定律，C 称为双曲线常数。

由于在平衡状态时，工件形状不再随时间变化，加工过程相当于理论力学中的刚体运动，因而在 θ 处的电解速度与阴极送进速度满足下式：

$$v_{a\theta} = v\cos\theta \tag{4.1-21}$$

式中 θ 为阴极送进方向 v 与电解速度 v_a 方向之间的夹角，若用 Δ_b 表示工件表面法向电解速度与阴极送进方向相同处，即 $\theta=0$ 处的平衡加工间隙，则有

$$\Delta_b = \frac{C}{v} \tag{4.1-22}$$

Δ_b 称为端面平衡间隙，则由式（4.1-20）、式（4.1-21）、式（4.1-22）可得在 θ 处的法向间隙 Δ_n 为

$$\Delta_n = \frac{\Delta_b}{\cos\theta} \tag{4.1-23}$$

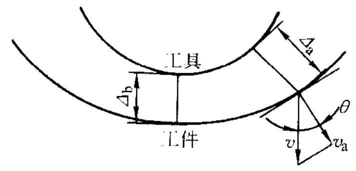


图 4.1-13　平衡状态下的电解速度与加工间隙

按式（4.1-23）计算不同 θ 处的平衡加工间隙的方法称为 $\cos\theta$ 法，其特点是随着夹角 θ 的增大，Δ_n 逐渐增大，这与实际测量结果是一致的。但是当 θ 超过一定值，特别是当 $\theta=90°$时，则 Δ_n 趋于无穷大，这显然不符合实际。试验研究结果表明，在通常直流电解加工中，$\cos\theta$ 法的实用范围是 $0°\leqslant\theta\leqslant45°$，当 $\theta>45°$以后，误差急剧增大，与实际结果相差太大而变得不再适用。

2.3.2 基于实际电场分布的成形规律研究

对电解加工间隙中的电场分布描述可知，按式（4.1-17）~式（4.1-19）进行间隙分布的计算和阴极设计，更符合工程实际，但其数学处理上也更加复杂。下面简要介绍求解问题的思路和大致过程。

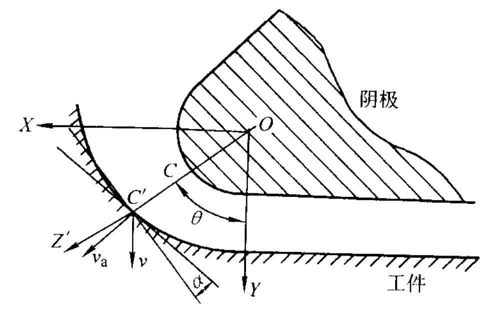


图 4.1-14　加工间隙变化率

如图 4.1-14 所示，设工具阴极沿 Y 轴以速度 v 作直线

等速运动，在 t 时刻，工具阴极和工件位于图示位置，对于工具阴极上的 C 点，加工间隙可用直线 CC' 代替，以 Δ_θ 表示，θ 为工具上 C 点法线（即 L 向）与 Y 向的夹角。假设经过 dt 时间后，也就是在 $t+dt$ 时刻，C 点处间隙变为 $\Delta_\theta + d\Delta_\theta$，在该 dt 时间内，工件表面 C' 处的电解速度为 $v_a = C/\Delta_\theta$，则可以推导得到间隙变化速度的基本微分方程：

$$\frac{d\Delta_\theta}{dt} = v_a - v\cos\theta - v\sin\theta\tan\alpha \qquad (4.1\text{-}24)$$

式中，α 为工具阴极上 C 点和工件表面上 C' 点处的切线间的夹角。

式（4.1-24）说明，如果加工开始处于非平衡状态，则随着加工进行，加工间隙逐渐变化，这一变化又会引起间隙中的电场分布的变化，从而引起阳极电解速度的变化，而阳极电解速度的变化反过来又会引起电场变化。如此相互影响，最后达到稳定平衡加工状态，则加工间隙和电场分布均达到稳恒状态，不再随时间而变化。对这一过程的成形规律研究需借助计算机进行模拟分析，具体过程如下：

1）根据给定的阴极形状和工艺参数，采用 cosθ 法或凭经验、或用等间隙分布的原则，预先给出初始（$t_0=0$ 时刻）阳极型面；

2）根据式（4.1-17）～式（4.1-19）组成的间隙中电场分布数学模型，求出间隙中的电位分布；

3）根据所求解出的电位分布及电流密度 $\boldsymbol{i}=\kappa\boldsymbol{E}$ 及阳极电解速度 $\boldsymbol{v}_a = \eta\omega\boldsymbol{i}$ 等关系式，得到 $t_0=0$ 时刻阳极型面各点的电解速度，并求解各点处的 α 角；

4）根据式（4.1-24），给 dt 一微小增量值，求出对应的间隙的微小增量 $d\Delta_\theta$，并由此可确定 $t_1 = t_0 + dt$ 时刻的阳极型面边界。

5）重复 2）～4）步，在计算机上不断对工件阳极型面进行模拟加工，由 $t=t_i$ 时刻的阳极型面求出 $t=t_{i+1}=t_i+dt$ 时刻的阳极型面，将前后型面进行比较，如果变化在给定的数值范围内，则认为前后两次型面相同，加工已进入平衡状态，此时的阳极型面即为最终所加工出的工件型面。

上述方法的求解难点在于求解间隙中的电位分布，在对其计算方法进行的研究中采用过有限差分法、变网格有限差分法和有限元素法等，其中既要解决计算速度和计算精度问题，还要解决"模拟加工过程"能否收敛到平衡加工状态的问题。实践证明，有限元法在网格划分和边界条件处理上具有更大的适应性，其计算精度高，收敛性好。

2.3.3 工具阴极的设计方法

前已述及，阴极设计是实际电解加工中需首先要解决的问题，其型面设计直接影响工件最终的成形精度，因此该项工作具有重大实际应用价值。阴极设计的任务是根据给定的工件形状去求解工具阴极形状。在工件成形精度要求不高的场合下，可采用 cosθ 法做近似设计，但当工件成形精度要求较高时，仍需按式（4.1-17）～式（4.1-19）所描述的间隙中电场分布来求解，但难度却更大，因为从数学角度来分析，该种情况下的阴极设计涉及拉普拉斯方程几何反问题求解，这在数学上至今还是一个难题，尽管有不少学者提出了各种方法，但其应用都有严格局限性，如有的仅限于二维情况，而有的仅限于特殊边界条件等，因此缺乏普遍的实用价值。下面介绍一种有限元法，对于存在的问题作了较大改进。

图 4.1-15 给出了一组工具阴极族的求解结果。其依据是已知工件形状和预定的工艺条件：阳极边界电位 $\phi_a = U$，电解液的电导率和电流效率均为常数。从图中可以看出，所求解的阴极不只是一个，而是一"族"，即图中除阳极边界外的等位面都可以作为阴极边界。不同的只是阴极边界电位

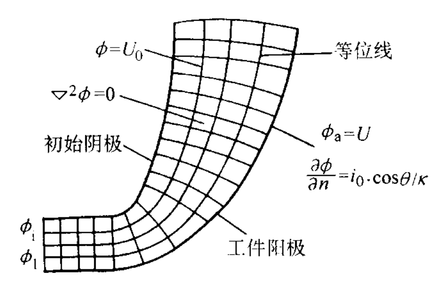


图 4.1-15 求解的工具阴极族

不同，或者说阴极与阳极间的电位差不同，但都能加工出同样的阳极型面。其求解过程是：先由 cosθ 法或等间隙原则，近似给出一个初始阴极边界（应当特别注意，由于给出的初始边界没有遵循实际电场分布的方程组，故给出的初始阴极边界上的电位不是 $\phi_c=0$）；在工件边界和初始阳极边界所包围的加工间隙区域内，电位分布服从拉普拉斯方程，由于 η 为常数以及边界条件的变化，其电位分布方程组整理如下：

$$\frac{\partial^2\phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\phi}{\partial y^2} = 0 \qquad (4.1\text{-}25)$$

阳极边界上：

$$\phi_a = \phi_1 = U \qquad (4.1\text{-}26)$$

$$\frac{\partial\phi}{\partial n} = \frac{i_0}{\kappa}\cos\theta \qquad (4.1\text{-}27)$$

上列方程组并没有完全反映间隙中的电场分布，因为只有阳极边界条件。为了求解符合实际电场分布的阴极边界，还需增加一个条件。根据变分原理，求式（4.1-25）～式（4.1-27）的电位分布，等价于求一个位函数 ϕ，使下列泛函为极小。

$$I(\phi) = \frac{1}{2}\iint\left[\left(\frac{\partial\phi}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial\phi}{\partial y}\right)^2\right]dxdy - 2\frac{i_0}{\kappa}\int\phi\cos\theta ds \qquad (4.1\text{-}28)$$

采用有限元方法将上列方程式（4.1-25）～式（4.1-28）离散化为线性方程组，求解即可以得到加工间隙中等位面函数 $\phi(x, y)$ 的递推式，即由 $\phi_1 = \phi = U$ 可以求出 $\phi_2(x, y)$，然而由 $\phi_1(x, y)$ 和 $\phi_2(x, y)$ 又可求出 $\phi_3(x, y)$，余类推可求出 $\phi_4(x, y)$ 和 $\phi_5(x, y)$，也就是一族阴极边界。

以上介绍的是两维边界情况，对于三维型面问题的求解要更复杂些，但数学方法没有实质变化，求解过程仍按上述步骤进行，只是有限元处理要采用六面体八节点等参数元方法；对于 η、k 变化的情况，则相应边界条件和泛函表达式与方程式（4.1-25）～式（4.1-28）中给出的略有不同，但求解过程也都类似，此处不再赘述。

3 电解加工间隙中的流场

电解加工间隙中的电场，建立在间隙中的流场这一物质场的基础上。流场、电场相互影响，且流场、电场的分布又都直接影响电化学溶解速度场，并由此影响电解加工间隙的分布。因此，研究电解加工间隙中的流场特性，是研究电解加工成形规律的基础。本节将基于电解加工间隙中的气液两相流动特点，论述电解加工间隙中的流场问题。

3.1 电解加工间隙中的流动特性——气液两相流动

电解加工过程中，大量的电解液流过加工间隙，同时由于电化学反应，阴极析出氢气，阳极溶解而产生电解产物，有时还有氧气、氯气或二氧化氮气体析出。故在电解加工间隙中所流过的是气、液、固三相流。由于电解产物所占的体积比很小，可以忽略其对电解液电导率及密度的影响，因此，可以将加工间隙中的气、液、固三相流问题简化，近似



为气、液两相流问题处理，而对于混气电解加工则更是如此。基于电解加工间隙中的气液两相流动特性，分析电解加工的成型规律，使研究更加接近实际。

3.1.1　气液两相流的流动参数

气液两相流动的参数，除每相各自的参数，例如各相流量、流速、压力、温度等参数外，还有某些相互关联的流动参数。为便于讨论和处理问题，还引入若干折算参数（又称假定参数、视在参数）。折算参数实际上并不存在，它只是在计算中的一种处理方法。这里将介绍与讨论电解加工间隙中气液两相流动有关的几个参数。

1）气泡率 β　它指单位时间内流过每一流通截面的两相流体总体积 Q 中气相介质所占体积的比例，即

$$\beta=\frac{Q_g}{Q}=\frac{Q_g}{Q_g+Q_l}$$

式中，Q_g 为流过某一流通截面的气相体积流量；Q_l 为液相体积流量；Q 为两相总体积流量。

在混气电解加工中，还常用气液混合比 Z 这一概念，即

$$Z=\frac{Q_g}{Q_l}$$

显见，气泡率 β 与气液混合比 Z 之间的关系为

$$\beta=\frac{Z}{1+Z}\text{ 或 }Z=\frac{\beta}{1-\beta}$$

2）截面含气率 φ　它指所研究的流通截面上气相所占截面积 A_g 与气液两相总流通截面积 A 之比，即

$$\varphi=\frac{A_g}{A}=\frac{A_g}{A_g+A_l}=\frac{Q_g/u_g}{Q_g/u_g+Q_l/u_l}$$

式中，Q 为体积流量；u 为流速；下标 g 为气相，下标 l 为液相（以下均同）。显见，当 $u_g=u_l$，即气相流速与液相流速相等时，截面含气率 φ 与气泡率 β 相等；否则，$\varphi\neq\beta$。

3）气液两相介质的流动密度 ρ

$$\rho=\frac{m}{Q}=\frac{Q_g\rho_g+Q_l\rho_l}{Q}=\beta\rho_g+(1-\beta)\rho_l=\rho_l-\beta(\rho_l-\rho_g)$$

注意到 $\rho_l\gg\rho_g$，则有 $\rho_l-\rho_g\approx\rho_l$，由此得到

$$\rho\approx(1-\beta)\rho_l$$

4）两相介质的真实密度 ρ_{CM}　它指流道中所研究截面上两相介质的实际密度，即

$$\rho_{CM}=\frac{\rho_g A_g+\rho_l A_l}{A}=\varphi\rho_g+(1-\varphi)\rho_l$$

类似于气泡率 β 与截面含气率 φ，流动密度 ρ 与真实密度 ρ_{CM} 是两个不同的概念，前者表示流动状态，后者表示实际存在。但当两相流速相同、即 $u_g=u_l$ 时，

$$\rho=\rho_{CM}$$

3.1.2　电解加工间隙中气液两相流动模型

前面已经得出了电解加工间隙中是气液两相流动的结论，而进一步对电解加工过程的具体分析，又可以作出以下符合电解加工过程实际条件的近似假设。这些假设使研究问题得到简化并不失其本质。

1）一维两相两成分均匀流型假设　气泡在液相中均匀分布，液相不可压缩，而气相状态变化服从理想气体状态方程，即 $p_g=\rho_g R_g T_g$；相间无质量转换，即不存在气液两相相互之间质量转换的情况；沿流动方向的每一横截面上各相参数均匀分布，即在同一横截面上有 $u_g=u_l=u$，$T_g=T_l=T$，$p_g=p_l=p$。

2）线性电场假设　阴、阳极表面均为等电位面，电极电位在电极/溶液界面上的非线性突变以适当量的极化电位或近似与分解电压 δE_0 等价；在电解液中，在垂直于电解液流动的方向上，电位呈线性分布，即具有等电位梯度。

3）平衡加工状态假设　电解加工处于平衡加工状态，各项参数不随时间变化而只是几何位置的函数；阳极溶解速度与阴极进给速度相等，加工间隙已达到平衡间隙，不再随时间而变化；电解液与阴、阳极间的热交换也处于热平衡状态。

基于上述假设，对于气液两相流应用质量、动量、能量方程，可以得到压力 p、气泡率 β、间隙 Δ、温度 T、流速 u 各项参数沿间隙通道的分布规律，从而可以研究电解加工的成形规律。

本节所要研究的是侧流式矩形电解加工间隙模型（图4.1-16），取流程 x 及 $x+dx$ 两个截面所包围的控制体进行分析。在流程 x 截面上相应的参数为 $p(x)$、$\Delta(x)$、$u(x)$、$\beta(x)$、$T(x)$、$\kappa(x)$；而在 $x+dx$ 截面上类似地写作 $p(x+dx)$，$\Delta(x+dx)$ 等。

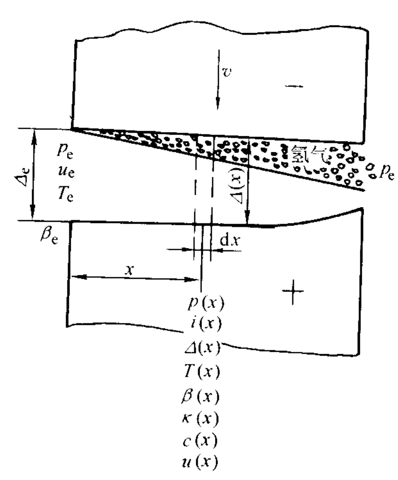


图4.1-16　侧流式矩形电解加工间隙模型

根据气液两相各自质量守恒、相互间无质量转换的假设，可以分别列出各相的质量连续方程，经整理得

$$\frac{p}{R_g T}\beta\Delta u=\eta_g k_g ix \tag{4.1-29}$$

$$(1-\beta)\Delta u=\Delta_0 u_0 \tag{4.1-30}$$

根据控制体在 x 方向上的动量变化等于作用于控制体的总合力在 x 方向上的投影，可以列出动量方程，经整理得

$$\Delta\frac{dp}{dx}+p\frac{d\Delta}{dx}+\rho_l\Delta_0 u_0\frac{du}{dx}=-2\tau-\eta_g k_g iu \tag{4.1-31}$$

根据控制体中各项能量关系，可以列出能量方程，经整理得

$$T=T_0+\frac{U_R i}{\rho_l u_0\Delta_0 C_l}x \tag{4.1-32}$$

为研究成形规律，还必须列出电解加工间隙的表达式，表达式经整理得

$$\Delta=\frac{U_R\kappa_0}{i}[1+\xi(T-T_0)](1-\beta)^n \tag{4.1-33}$$

式（4.1-29）～式（4.1-33）构成了侧流式矩形电解加工间隙模型的基本方程组。

在上列各式（及本书随后式）中：τ 为黏性剪切力；κ 为电解液的电导率（参数有下标“0”为间隙进口处参数，未加下标则为流程 x 横截面上的参数）；U_R 为加工间隙 Δ 方向上电解液的欧姆压降；i 为加工电流密度；ρ_l 为电解液密度；C_l 为电解液热容；ξ 为电导率温度系数；n 为考虑气泡率 β 对电导率影响的指数，从 $n=1.5\sim2$ 中选取，通常可取 $n=1.5$；R_g 为氢气的气体状态参数；η_h 为析氢的电流效率；k_g 为析氢质量电化当量。

该方程组描述了加工参数对流动参数、加工间隙的影响

及其沿流程的分布规律，不仅适用于如图 4.1-16 所示的侧流式矩形加工间隙模型，也可用于间隙通道曲率半径 $R=80\sim800$ mm 的缓变侧流式间隙模型。由此模型研究所得出的有关结论，对于分析其它诸如径向正流、径向反流等流场问题也有重要参考价值。

3.2 基于流场分析的电解加工成形规律

在得到了描述间隙模型的基本方程组后，进一步求解此方程组，就可揭示流场参数及加工间隙的分布规律，分析气液两相流动对电解加工过程的影响。在此基础上可讨论流场对成形规律的影响。

3.2.1 流场参数及加工间隙分布规律

在模型基本方程组式（4.1-29）~式（4.1-33）中，自变量为流程 x，待求函数为 $\beta(x)$、$p(x)$、$u(x)$、$T(x)$、$\tau(x)$、$\Delta(x)$，即流场参数沿流程的分布，而方程组中其他参数则为由加工条件决定的常量，或为间隙进口边界条件。

由气液两相流动的理论计算，可以将 $\tau(x)$ 写作 $\beta(x)$、$u(x)$、$\Delta(x)$ 的函数，故方程组中包含除 $\tau(x)$ 之外的共五个待求函数，则从五个方程原则上可以求解这五个待求函数，但求解过程比较繁杂，此处从略，只将其结果列出如下：

$$\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}x}=\left[-2\tau-b_gR_\kappa\frac{T}{u}\left\{1+(\rho_1\Delta_0u_0u-p\Delta)\frac{1+n}{p\Delta}+\frac{a_Tx}{T}\right\}+\frac{a_T}{\Delta}\left(\rho_1\Delta_0u_0-\frac{p\Delta}{u}\right)\times\left[\xi\Delta_0(1-\beta)^nu-(1+n)b_gR_\kappa\frac{x}{p}\right]\right]\times 1/\left[\Delta(1+n\beta)\left[1-\frac{1+n}{1+n\beta}\times\frac{\rho_1\beta(1-\beta)u^2}{p}\right]\right] \tag{4.1-34}$$

$$T=T_0+a_Tx \tag{4.1-35}$$

$$\beta=\frac{b_gR_gTx}{b_gR_gTx+\Delta_0u_0P} \tag{4.1-36}$$

$$\Delta=\Delta_0[1+\xi(T-T_0)](1-\beta)^n \tag{4.1-37}$$

$$u=\frac{\Delta_0u_0}{(1-\beta)\Delta} \tag{4.1-38}$$

式中 $a_T=\dfrac{U_Ri}{\rho_1C_1u_0\Delta_0}$，$b_g=\eta_gk_gi$，$\Delta_0=\dfrac{U_R\kappa_0}{i}$

其中相关参数 a_T、b_g、Δ_0 可以根据加工参数，电解液组成以及间隙进口边界条件计算，相对于上述求解函数可视为常量。

在上述求解函数 $p(x)$、$T(x)$、$\beta(x)$、$\Delta(x)$、$u(x)$ 中，除 $T(x)$ 是变量的显函表达式外，其余均互为隐函表达式，还包括微分表达式，故具体求解结果只有在计算机上采用数值计算方法得到，典型的计算结果绘于图 4.1-17 所示各对应曲线。该组曲线反映了在考虑气液两相流动特性条件下的各项流场参数及加工间隙沿流程的分布规律，由此也可以揭示气液两相流动对加工过程影响的物理本质。

3.2.2 气液两相流动对电解加工过程的影响

基于式（4.1-34）~式（4.1-38）所表示的模型参数求解结果及图 4.1-17 所表示的流场参数、加工间隙沿流程的分布规律，可以进一步分析气液两相流动对电解加工过程影响。参照图 4.1-17 可以发现参数沿流程的变化及其相互影响的内在规律。

1）间隙通道各横截面的气体体积沿流程增加，从而使气泡率沿流程增加。

参见图 4.1-17 所示的气泡率曲线 β 沿流程 x 的变化，开始随 x 增加，β 近似线性增加；接近出口处，β 增加越来越快，即 β 增加的速率 $\dfrac{\mathrm{d}\beta}{\mathrm{d}x}$ 越来越大。究其原因，可以从式（4.1-36）得到解释。

式（4.1-36）还可以写成

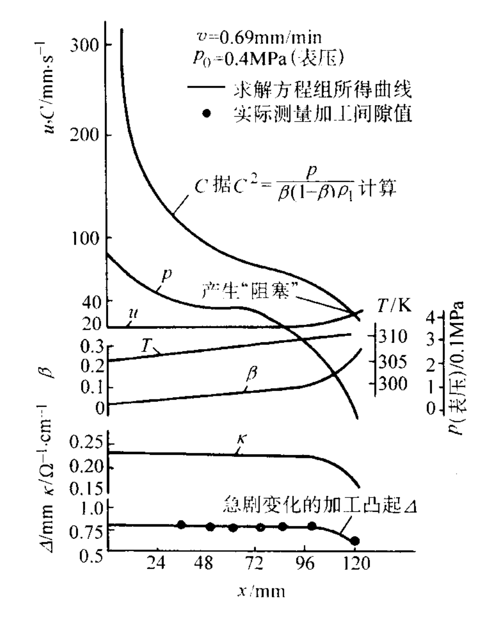


图 4.1-17 流场参数及加工间隙沿流程的分布

$$\beta=\frac{b_gx\dfrac{R_gT}{p}}{b_gx\dfrac{R_gT}{p}+\Delta_0u_0} \tag{4.1-39}$$

注意到 $b_gx=\eta_gk_gix=m_g(x)$，即为流过 x 截面上的氢气质量流量；$\dfrac{R_gT(x)}{p(x)}=v_g(x)$，即为氢气通过 x 截面时的比体积；故 $b_gx\dfrac{R_gT(x)}{p(x)}=m_g(x)v_g(x)=q_g(x)$，即为通过 x 截面的体积流量。还注意到在进口处 $\beta_0=0$，故 $\Delta_0u_0=q_1$，即为液相体积流量；因为假设液相不可压缩，故在整个流程上保持不变。还需指出，上述"流量"是指单位间隙宽度截面上的流量；例如 $q_1=\Delta_0u_0\times1$，而整个间隙宽度 B 截面上的流量 $Q_1=q_1B=\Delta_0u_0B$。可见，取单位间隙宽度截面上的流量进行分析，与讨论整个间隙宽度截面上流量变化规律完全相同，其数量上只差一个常量即间隙宽度 B。

经上述分析，则可将式（4.1-39）改写成

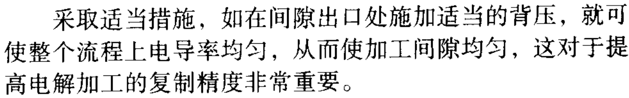
$$\beta=\frac{m_g(x)v_g(x)}{m_g(x)v_g(x)+\Delta_0u_0}=\frac{q_g(x)}{q_g(x)+q_1(x)}=\frac{Q_g(x)}{Q_g(x)+Q_1} \tag{4.1-40}$$

由上述可知：随流程 x 增加，气相质量增加，同时又因为压力降低和温度升高使气相比体积增加，结果气相体积流量增加；但随 x 增加，液相体积流量不变；综合结果，使得气泡率沿流程增加；且由于在接近间隙出口的一端压力急剧降低（参见图 4.1-17 中曲线 p），故气泡率增加速率更快（参见图 4.1-17 曲线 β）。

2）两相介质温度沿流程线性增加（参见图 4.1-17 曲线 T） 据式（4.1-35）$T(x)=T_0+a_Tx$ 可知，温度沿流程线性增加，增加率为 $a_T=\dfrac{U_Ri}{\rho_1C_1u_0\Delta_0}$，它是由加工参数和间隙进口边界条件所决定的常数。由此可知随加工电压和电流密度增加，温度升高更快，但随电解液流速的增加，温升减慢。

3）气泡率和温度综合作用影响电导率，从而使加工间隙沿流程变化（如图 4.1-17 曲线 κ 和 Δ）。由间隙进口至出口，温度沿流程升高，则电导率增加而使加工间隙增大；但同时气泡率沿流程增加又使电导率减小，则使加工间隙减





少。两者综合作用可归纳为以下计算式：

$$\kappa(x)=\kappa_0[1+\xi(T(x)-T_0)][1-\beta(x)]^n \tag{4.1-41}$$

$$\Delta(x)=\Delta_0[1+\xi(T(x)-T_0)][1-\beta(x)]^n \tag{4.1-42}$$

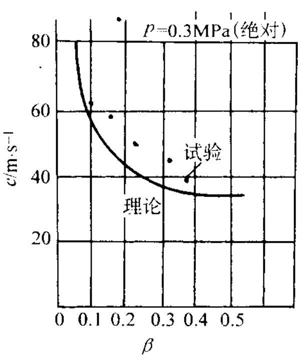
式中 $[1+\xi(T(x)-T_0)]$ 描述了温度的影响，而 $[1-\beta(x)]^n$ 则反映了气泡率的作用。通常在进口一端的温升影响占优，故加工间隙逐渐增大；而在出口一端则以气泡率影响占优，则加工间隙逐渐减少。这一研究结果（图 4.1-17 中曲线 Δ）为试验加工所证实（图 4.1-17 中以实测数据点·表示）。

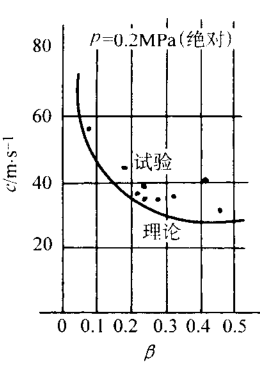
采取适当措施，如在间隙出口处施加适当的背压，就可使整个流程上电导率均匀，从而使加工间隙均匀，这对于提高电解加工的复制精度非常重要。

4）气液两相流的声速低，在较大气泡率的范围内和电解液流速处同一数量级，故有可能在电解加工间隙出口处产生流动“阻塞”现象而影响加工过程。

理论研究与实验结果均表明，气液两相流声速 c，即微弱扰动压力波在气液两相介质中的传播速度，是压力 p 和气泡率 β 的函数。即

$$c^2=\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}\rho}\approx\frac{p}{\beta(1-\beta)\rho_1} \tag{4.1-43}$$





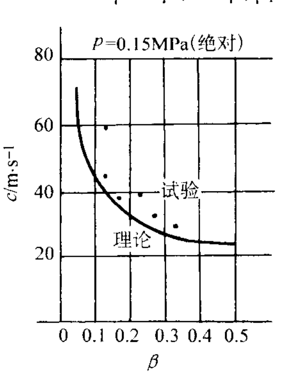


图 4.1-18　等径管中空气－水两相流声速

（理论曲线据 $c^2=\frac{p}{\beta(1-\beta)\rho_1}$ 计算，试验数据由短管法测得）

据式（4.1-43）所作的理论声速曲线及有关实测声速结果示于图 4.1-18。结果表明，在通常大气压条件下，当 $\beta=0.5$ 时，气液两相介质的声速接近 20 m/s，而在一般低压条件下，在较大的气泡率范围内，如 $\beta=0.05\sim0.95$ 范围内，其声速为每秒几十米，与电解液流速处同一数量级。

在电解加工间隙中，由于电解液压力和气泡率沿流程改变，故声速也沿流程而变化（参见图 4.1-17 中的声速曲线 c）。在进口端，压力高，气泡率接近于零，故声速值高；而在出口端，压力降低至接近大气压力，而气泡率与流速逐渐增加，直至出口截面，声速降低到等于流速（参见图 4.1-17 中声速曲线 c 与流速曲线 u 在出口处相交），此时马赫数 $Ma=u/c=1$ 即产生流动“阻塞”（又称“壅塞”）现象。由此引起出口处流动参数的急剧变化，导致电解加工过程不稳定，在工件型面的出口边加工出一个急剧变化的凸起（参见图 4.1-17 中工件型面曲线 Δ），有时还会产生较深的流痕，应采取措施予以避免。关于气液两相流动的试验研究表明，防止“阻塞”的有效措施是在出口截面处施加一定的背压，至少要在间隙出口端紧接一定长度的收敛导流段，以保持在间隙出口截面上压力较高，从而使声速提高，保持流动为 $Ma<1$ 即亚声速稳定流动状态，“阻塞”现象也就不会发生了。

3.2.3　流场对成形规律的影响

由加工间隙中气液两相流动特性而导致间隙中电解液流速、压力、温度和气泡率的特定分布规律，造成间隙中各处电解液电导率不同。电导率的不均匀分布将对加工间隙的分布也即成形规律产生重要影响。

上述对于侧流式矩形电解加工间隙模型的分析和试验也充分反映了这一结论。由于间隙中压力沿程降低、加工时阴极一边析出氢气并沿程积累致使沿程气泡率提高而导致电导率下降，电解液沿程温升而使电导率提高。综合影响使电导率不均匀分布，导致加工间隙的不均匀分布。其结果是一个平面阴极加工出一个倾斜的阳极型面。进一步推论，如果加工型面更加复杂，则上述影响的作用也将更为复杂。

因此，在研究成形规律时，应该充分考虑流场的影响。只有这样，才能建立起比较符合实际的、有较高精度的加工间隙数学模型。

4　电解加工间隙及电解加工成形规律的综合分析

4.1　加工过程的基本微分方程及应用

电解加工是有间隙加工，研究加工过程间隙变化规律对掌握电解加工工艺规律，保证加工过程的稳定从而控制加工精度有重要意义。研究电解加工间隙变化规律必须考虑以下几点。

① 间隙内的电极过程，特别是阳极溶解过程，与电流效率 η，体积电化学当量 ω 以及欧姆压降 U_R 有密切关系。

② 间隙内电解液的流动方式以及间隙内各点的流速与压力分布直接影响间隙内的温度、氢气泡及氢氧化物的分布，从而影响电导率 κ 的分布，影响间隙的大小和加工过程的稳定。

③ 电极过程、流场及电导率分布综合反映为间隙内部电流密度的分布，而电解加工的复制精度取决于间隙内电流密度的分布。

影响电解加工间隙的因素是相当复杂的，以最简单情况分析加工间隙的过渡过程，将电极和工件简化为如图 4.1-19 所示的平板电极，同时作以下假设：

① 阴极与工件的电导率比电解液的电导率大得多，可以认为阴极与工件的各自表面是等电位面；

② 电解液的电导率在加工间隙内是均匀的，而且不随时间变化而变化；

③ 与加工间隙相比，加工面积足够大，因而可以忽略边界效应。

4.1.1　电解加工的间隙过渡微分方程

设在初始间隙中电解液流速为 u，阴极与工件之间外加电压 U，工具阴极以速度 v_c 恒速进给，根据式（4.1-20）

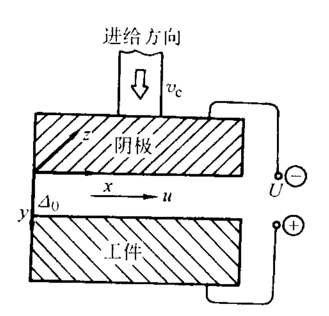


图 4.1-19　平板电极加工

可以推论，此时工件表面的溶解速度 $v_a = \eta\omega\kappa \dfrac{U_R}{\Delta}$。注意到：在电解加工整个过程，阴极表面形状、尺寸都不会改变；同时，在图 4.1-19 及所设坐标系中，阴极沿 y 方向进给，x 是电解液流动方向，加工面相对阴极间隙为 Δ，初始间隙为 Δ_0，工件加工深度为 h，并假设沿 z 方向所有条件都不改变；则从图 4.1-19 所示几何关系可知，加工 t 时间后的间隙 Δ 为

$$\Delta = \Delta_0 + h - v_c t \tag{4.1-44}$$

将上式微分，并注意到 Δ_0、v_c 为常数，则可以得到：在 dt 时间内，阴极溶解深度 dh 与加工间隙的变化量 $d\Delta$ 之间的关系为

$$d\Delta = dh - v_c dt \tag{4.1-45}$$

因为 $dh = v_a dt = \eta\omega\kappa \dfrac{U_R}{\Delta} dt$，由式（4.1-44）及式（4.1-45）可得

$$d\Delta = \left(\eta\omega\kappa \frac{U_R}{\Delta} - v_c\right) dt$$

如前所述，令 $C = \eta\omega\kappa U_R$，且知 C 为常数，则可得

$$d\Delta = (v_a - v_c)dt = \left(\frac{C}{\Delta} - v_c\right)dt$$

$$\frac{d\Delta}{dt} = \frac{C}{\Delta} - v_c \tag{4.1-46}$$

上式就是阴极恒速进给时加工间隙变化的过渡过程基本微分方程。

4.1.2　平衡间隙

由式 $v_a = \eta\omega\kappa \dfrac{U_R}{\Delta} = \dfrac{C}{\Delta}$，有 $C = v_a \Delta$，即在一定条件下，电解加工速度与电解加工间隙之积为常数，相互之间呈双曲线函数变化的反比关系（参见图 4.1-20）。而如果阴极固定不动，电解加工初始间隙为 Δ_0，随着加工进行，电解加工间隙 Δ 将逐渐增大，而电解加工速度 $v_a = \dfrac{C}{\Delta}$ 将逐渐减小，其定量计算将随后介绍。

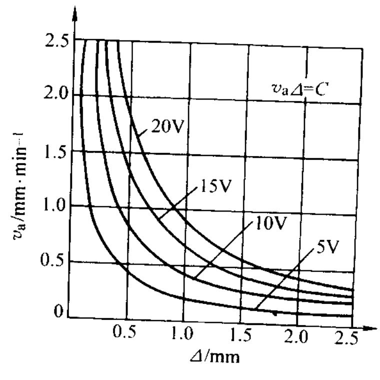


图 4.1-20　v_a 与 Δ 关系曲线

如图 4.1-21 所示，如果阴极以恒速 v_c 向工件进给，不管 v_c 及 Δ_0 为何值，总有一个时刻 $v_a = v_c$，即工件的电解蚀除速度 v_a 与阴极的进给速度 v_c 相等，即两者达到动态平衡，$d\Delta = (v_a - v_c)dt = 0$，此时加工间隙将稳定不变。对应的间隙称为端面平衡间隙 Δ_b，且有

$$\Delta_b = \eta\omega\kappa \frac{U_R}{v_c} \tag{4.1-47}$$

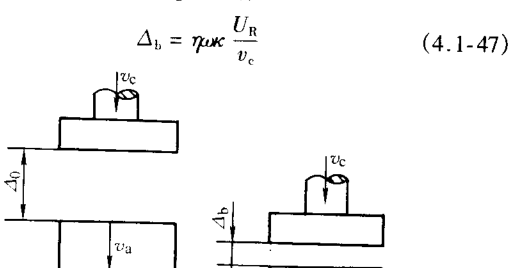


图 4.1-21　端面平衡间隙

同理，端面平衡间隙与进给速度也呈双曲线函数变化的反比关系，当阴极的进给速度 v_c 过大时，端面平衡间隙 Δ_b 过小，将会引起局部堵塞，造成火花放电或短路。实际加工的端面平衡间隙，主要决定于所选用的电压、电解液的组成和加工进给速度，一般为 0.1～0.8 mm，型面加工时常选 0.25～0.4 mm。

如图 4.1-22 所示，在电解加工经过 t 时间后，工具阴极的进给距离为 L，工件表面的电解深度为 h，此时加工间隙为 Δ，随着加工进行，Δ 将逐渐趋向于平衡间隙 Δ_b。如果起始间隙 Δ_0 与平衡间隙 Δ_b 的差别愈大，或进给速度愈小，则过渡过程愈长。

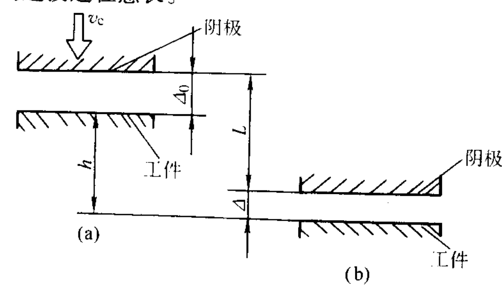


图 4.1-22　加工间隙的过渡过程图解

为便于运算，引入两个无因次变量 $\Delta' = \dfrac{\Delta}{\Delta_b}$，$t' = \dfrac{L}{\Delta_b} = \dfrac{v_c t}{\Delta_b}$，$\Delta'$ 表示 Δ 向 Δ_b 的趋近程度，t' 表示相对进给深度，t' 愈大，愈接近平衡间隙。

将 Δ' 及 t' 进行微分并进行运算，得到

$$t' = (\Delta'_0 - \Delta') + \ln\left(\frac{\Delta_b - \Delta_0}{\Delta_b - \Delta}\right)$$

将上式左、右两边都乘以 Δ_b，得到

$$L = v_c t = (\Delta_0 - \Delta) + \Delta_b \ln\left(\frac{\Delta_b - \Delta_0}{\Delta_b - \Delta}\right) \tag{4.1-48}$$

将 Δ' 及 t' 代入式（4.1-48）后，可得一簇曲线（图 4.1-23），根据加工条件，由查图法很容易得出加工过程任意时刻 t 的加工间隙 Δ。

4.1.3　法向间隙

上述端面平衡间隙 Δ_b 是在垂直于进给方向的阴极端面与工件表面间的间隙。对于锻模等型腔工具来说，工具端面的某一区域不一定与进给方向垂直，可能如图 4.1-24 所示成一倾斜角 θ，倾斜部分各点的法向进给速度 v_n 为

$$v_n = v_c \cos\theta$$

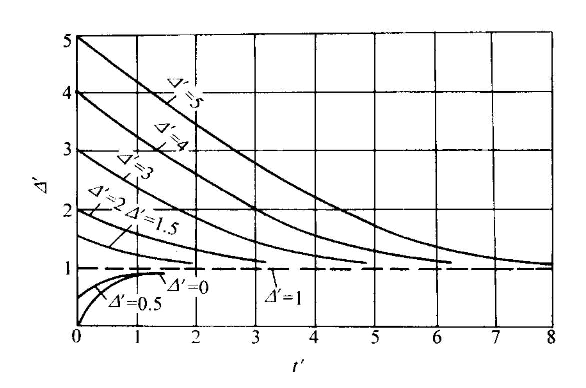


图 4.1-23　Δ'-t' 曲线

将此式代入式（4.1-47），即得在 θ 角度处（图 4.1-24）的法向平衡间隙

$$\Delta_n = \eta\omega\kappa\frac{U_R}{v_c\cos\theta} = \frac{\Delta_b}{\cos\theta} \qquad (4.1\text{-}49)$$

图 4.1-24　法向间隙

在应用上式进行法向间隙计算时，必须注意，此式是在进给速度和蚀除速度达到平衡、间隙是平衡间隙而不是过渡间隙的前提下才是正确的，实际上倾斜底面在进给方向的加工间隙往往并未达到平衡间隙 Δ_b 值。底面愈倾斜，即 θ 角愈大，计算出的 Δ_n 值与实际值的偏差也愈大，因此，只有当 $\theta\leqslant45°$ 且精度要求不高时，方可采用此式。当底面较倾斜，即 $\theta>45°$ 时，应按下述侧面间隙计算，并适当加以修正。

4.1.4　侧面间隙

电解加工型孔，决定尺寸和精度的是侧面间隙 Δ_s。阴极侧面绝缘和不绝缘时，其侧面间隙将显著不同。例如，用 NaCl 电解液、侧面不绝缘阴极加工孔时，工件型孔侧壁始终处于被电解状态，势必形成"喇叭口"（参见图 4.1-25a）。假设在进给深度 $h=v_ct$ 处的侧面间隙 $\Delta_s=x$，由式 4.1-47 知，该处在 x 方向的电解蚀除速度为 $\frac{\eta\omega\kappa U_R}{x}$，经过时间 dt 后，该处的间隙 x 将产生一个增量 dx，且 $dx=\frac{\eta\omega\kappa U_R}{x}dt$，对其进行积分，经运算可以得到

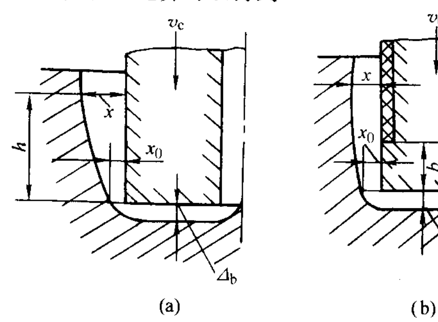


图 4.1-25　侧面间隙

$$\Delta_s = x = \sqrt{\frac{2\eta\omega\kappa U_R}{v_c}h + x_0^2} = \sqrt{2\Delta_b h + x_0^2} \quad (4.1\text{-}50)$$

当工具底侧面处的圆角半径很小时，$x_0\approx x_b$，则有

$$\Delta_s = x = \sqrt{2\Delta_b h + \Delta_b^2} = \Delta_b\sqrt{\frac{2h}{\Delta_b}+1} \qquad (4.1\text{-}51)$$

上式说明，阴极工具侧面不绝缘时，侧面任一点的间隙将随工具进给深度 $h=v_ct$ 而变化，为一抛物线函数关系，因此工件侧面为一抛物线状的喇叭口。

如果阴极侧面如图 4.1-25b 所示进行绝缘，只留一宽度为 b 的工作圈，则在工作圈以上的工件侧面不再遭受二次电解腐蚀而趋于平直，此时侧面间隙 Δ_s 与工具的进给量 h 无关，只取决于工作圈的宽度 b，即

$$\Delta_s = \sqrt{2b\Delta_b + \Delta_b^2} = \Delta_b\sqrt{\frac{2b}{\Delta_b}+1} \qquad (4.1\text{-}52)$$

4.1.5　平衡间隙理论的应用

1）计算加工过程中各种间隙。如端面、斜面、侧面间隙，从而可以根据阴极的形状尺寸来推算加工后工件的形状和尺寸。因此，电解加工间隙的变化规律也就直接影响并决定了电解加工工件的成形规律。

2）选择间隙、电源电压、进给速度等加工参数。使用时，一般是根据式（4.1-47），选择电源电压、进给速度以保证合适的加工间隙。

3）分析加工精度。如计算整平比及由于毛坯余量不均匀所引起的误差；阴极、工件位置不一致引起的误差，此外可以计算为达到一定的加工精度所需的最小电解加工进给量。

4）通常在已知工件截面形状的情况下，阴极的侧面、端面及法向尺寸均可根据端面、侧面及法向平衡间隙理论计算出来。如根据法向间隙计算公式 $\Delta_n=\Delta_b/\cos\theta$，可用 $\cos\theta$ 作图法由工件截面来设计阴极，计算阴极尺寸及其修正量。

图 4.1-26 是 $\cos\theta$ 法设计阴极的图解，当工件的形状已知时，在工件型面 2 上任选一点 A_1，作型面法线 A_1B_1 及与进给方向平行的直线 A_1C_1，并取线段长度 A_1C_1 等于平衡间隙 Δ_b，再从 C_1 点作与进给方向垂直的直线 C_1B_1，交法线 A_1B_1 于 B_1 点；由几何关系可知，这段法线长度 A_1B_1 就是 $\Delta_b/\cos\theta_1$，即过工件型面上 A_1 点的法向间隙 Δ_n，而 B_1 点也就是在工具阴极上所找到的对应工件型面上 A_1 点的对应点。依此类推，可以根据工件上的 A_2、$A_3\cdots A_n$ 等点求得阴极上对应 B_2、$B_3\cdots B_n$ 等点，将 B_1、B_2、$B_3\cdots B_n$ 等点连接并经样条光顺处理，就可得到所需要的工具阴极加工面的轮廓线，即图中的曲面轮廓线 1。要指出的是，当 $\theta>45°$ 时，采用此法处理则误差较大，其一般解决的办法是先按求侧面间隙的方法进行计算，然后再作适当修正。

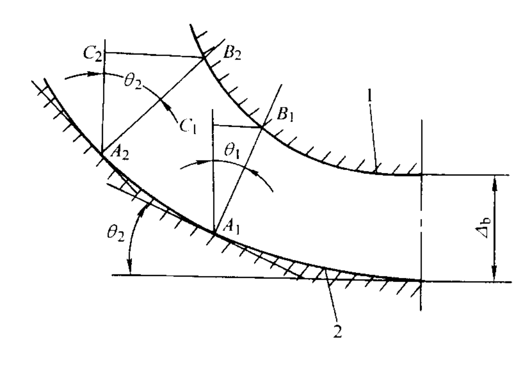


图 4.1-26　cosθ 作图法设计阴极

1—阴极加工面；2—工件被加工面

为了提高阴极的设计精度，缩短阴极的设计和制造周期，可根据电解加工间隙理论利用计算机辅助设计（CAD）、逆向工程数字化设计、制造等先进方法来设计制造阴极，有望解决电解加工中阴极设计制造的技术难题。



4.2 理想电解加工过程和成形规律

电化学理论、电场理论、流场理论构成了电解加工的理论基础。正是基于上述电解加工过程的电化学特性、电解加工间隙中的电场特性及流场特性进行电解加工理论与实践的研究。中心任务是要掌握电解加工成形规律，即建立电解加工的数学物理模型，求解电解加工速度和电解加工间隙的时(时间 t)、空（空间位置 x、y、z）分布，目的是为了解决以下三个有关电解加工研究与应用的重要问题。

① 能在计算机上模拟电解加工过程，掌握不同加工时刻，尤其是开始、过渡、稳定平衡三个不同阶段在加工区域内的电场、间隙的分布；为分析加工精度和工艺指标提供依据。

② 进行阴极设计和工件形状预测。即根据已知工件形状和加工条件，设计相应的阴极形状；或反之，已知阴极形状和预定加工条件，预测将加工出的工件形状。

③ 能科学准确地分析各种因素对电解加工过程的影响，从而为改进工艺过程、提高加工技术经济指标，提出有效的工艺措施。

由上可知，掌握电解加工成形规律，对于促进电解加工的应用与发展非常重要，故以下将对成形规律问题作进一步的分析。

在电解加工技术刚刚诞生的时候，人们首先注意到的是电场，尤其是电场中电流线分布对成形规律的影响。以后又逐渐总结出电场起决定作用的成形规律的研究方法，即把成形规律归结为描述电场强度、电流线矢量的时、空分布，认为加工间隙矢量就是电流线矢量，即认为电流线的空间位置、长度就是加工间隙的空间位置和长度。对此进行严格的数理推论，则出现了以线性电场描述为基础的理想加工过程的成形规律研究方法，它以如下假设为前提条件。

① 在全加工过程和整个加工间隙中，电解液各向同性，即各处电导率 κ 和电流效率 η 都相同，均分别为常数。

② 在全加工过程，阳极/电解液界面和阴极/电解液界面上的电极电位均分别视为常数；通常以实验测定的平均分解电压 δE_0 近似替代两电极电位之差 E_a-E_c，即

$$\delta E_0=E_a-E_c\text{，从而 } U_R=U-\delta E_0$$

对于确定的工件材料及所选用的电解液，近似取 δE_0 为常数。

③ 间隙电解液中欧姆定律成立，即

$$\boldsymbol{i}=-\kappa\left(\frac{\partial\phi}{\partial x}\boldsymbol{e}_x+\frac{\partial\phi}{\partial y}\boldsymbol{e}_y+\frac{\partial\phi}{\partial z}\boldsymbol{e}_z\right)$$

④ 阳极电化学溶解服从法拉第定律，即 $v_a=\eta\omega i$。

⑤ 基于以上假设，则间隙中的电场是无源稳恒电流场，其电场电位在各向均呈线性分布，即可用拉普拉斯方程描述：

$$\frac{\partial^2\phi}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\phi}{\partial y^2}+\frac{\partial^2\phi}{\partial z^2}=0$$

基于以上分析，原则上可以列出相应方程和边界条件并求出间隙中电场分布，尤其是电流线矢量和间隙矢量，即掌握相应过程的成形规律。有关内容前面已有介绍，但须特别指出两点。

1）求解电位分布，即求解拉普拉斯方程是关键步骤。但至今，只能对少数特殊形状的电场，例如平行平面之间的、环形的、球面的电场可用解析法精确求解。对于其他大量复杂的，如复杂三维型面存在的电场，则不能用解析法而只能在计算机上用数值解法近似求解，其中有限差分法、有限元法得到成功的应用，在计算机上模拟加工过程逐渐进行迭代运算，最后收敛于平衡加工状态的稳定电场和稳定加工间隙分布。

2）所谓理想的，即简化为以电场起决定作用的成形规律，是指以电流线矢量为加工间隙矢量。而实际电流线大都是空间曲线，由阳极表面上各点的法向开始，到阴极表面上相应一点法向进入而结束，如图 4.1-27a 中所示的虚线 AK。考虑到这种实际曲线的电流线矢量计算工作量太大，还考虑到一般加工间隙 Δ 处于 10^{-1} mm 数量级，而电极型面曲率半径 R 一般处于 $10^0\sim10^1$ mm 数量级，则 $\Delta/R=10^{-1}\sim10^{-2}$ 数量级，在如此几何结构的窄小间隙中，以直线代替曲线，不会产生太大的误差而可以满足工程精度要求，故选用直线段来代替曲线电流线。问题是：电力线的起点（阳极表面上）和终点（阴极表面上）处各自表面的法向不同，参见图 4.1-27a，如论及阳极表面上 A 点的间隙，可以自 A 点由阳极表面法向引直线，交阴极表面于 K'，则取 AK' 直线段代替电流线 AK 作为间隙；也可以自 A 点作垂直于阴极表面的垂线并交阴极型面于 K''，则也可以取 AK'' 代替电流线 AK 作为间隙（参见图 4.1-27a）。如前所述，电解加工间隙的几何结构为 $\Delta/R=10^{-1}\sim10^{-2}$，则无论取 AK' 还是 AK'' 代替 AK，都无碍于计算精度，只要在计算过程中注意考察其收敛性而作决定就可以了。图 4.1-27b 就是由工件表面法向引出直线段作为间隙 Δ_θ 而求解阴极型面的，是应用 $\cos\theta$ 法求解阴极的典型图解。

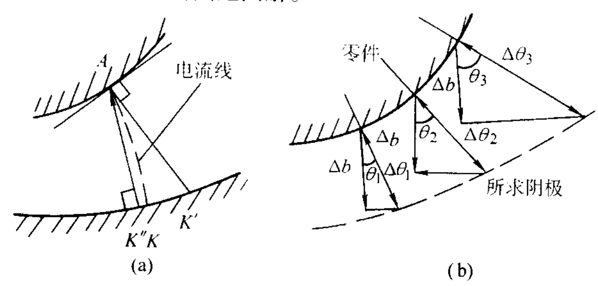


图 4.1-27 阴极型面求解

4.3 非理想电解加工过程及其成形规律

在实际电解加工过程中，完全符合理想加工过程的情况不多，但有大量可近似认为符合理想加工过程，或还有的加工过程虽不符合理想加工条件，但为了能进行成形规律的计算，仍先作理想过程处理，然后再考虑由于某些条件不符合而可能引起的误差，采用修正、补偿的方法。这就是为什么理想过程的成形规律仍然得到大量应用的原因。随着科学技术的发展和计算机的广泛应用，已经越来越有条件研究非理想电解加工过程的成形规律问题，使得成形规律的研究更接近实际加工条件，求解成形规律的精度更高。

对照理想加工过程的假设条件，可以发现，非理想加工过程平衡状态下加工间隙的电位分布 ϕ（x，y，z）、电流分布 i（x，y，z）和阳极电解速度 v_a（x，y，z）的表达形式均与理想加工过程的假设 3、4、5 类似，不同的是电解液的电导率 κ、电流效率 η 已不是常数，而是随另外的参数而变化的函数；由于 κ、η 的变化，必将影响电位 ϕ（x，y，z）和电流 i（x，y，z）的变化；如果再考虑实际电解加工条件下的电极极化问题，那成形规律的研究就复杂得多，以下分别介绍处理具体问题的方法。

4.3.1 关于电导率的变化

在电解加工过程中，阴极反应中会有大量氢气析出，在一定条件下也可能有氧气、氯气和二氧化氮等气体析出。析出的气体均以微小气泡形式均匀混合在流过加工间隙的电解液中，形成气液两相流，其电导率随气体含量的增加而降低；同时由于加工电流通过电解液产生焦耳热，使电解液温度随流程而增加，从而使电导率也随流程而增加，含气量和温升两者综合的影响，使电解的电导率产生不均匀分布，从而使加工间隙发生变化。对接近于一维流动的加工间隙模



型，其数学表达式可采用式（4.1-41）和式（4.1-42），即

$$\kappa(x) = \kappa_0[1+\xi(T(x)-T_0)][1-\beta(x)]^n$$

$$\Delta(x) = \Delta_0[1+\xi(T(x)-T_0)][1-\beta(x)]^n$$

式（4.1-41）中 $[1+\xi(T(x)-T_0)]$ 一项描述了温度的影响；而 $[1-\beta(x)]^n$ 一项则反应了气泡率 β 的影响；Δ_0 为电解液入口处加工间隙，$\Delta_0=\kappa_0\dfrac{U-\delta E}{i_0}$；温度、气泡率、电导率以及加工间隙的变化均在图4.1-17上作了形象表示。平面阴极，加工出的不是平面，而是随流程而变化的曲面。这说明理想加工的成形规律模型与实际加工过程还有较大误差，特别是在电解液流程较长的时候，影响更大，不能忽略。

对于电导率的变化，则要用电解加工间隙中的气液两相介质的流场特性来分析、处理，即除了主要考虑电场因素外，还要考虑流场因素，电场是建立在电解液流场这一载体上，如果仅考虑"纯电场"，就要产生一定的误差。故处理电导率变化的问题，要用气液两相流动的基础理论来分析解决。

4.3.2 关于电流效率 η 的变化

对 NaCl 电解液，通常 $\eta(i)\approx100\%$，对不同 i 均保持不变，故称为线性电解液；而某些钝性电解液，如 $NaNO_3$、$NaClO_3$，其电流效率随 i 变化，记为 $\eta=\eta(i)$，是电流密度 i 的函数，故在基于电场、流场理论的电解加工数学物理模型中，η 与别的参数相互影响，或者从数学函数关系来讨论，它们之间可能互为隐函，则在模型方程的求解中就比较麻烦，如多次迭代，又可能会产生一个是否收敛的问题。关于具体计算过程中的问题，本节难以作详细讨论，只对处理电流效率变化问题的思路作一简单介绍。

首先，通过实验法得到 ηi 曲线，或 ηi 表格，或 ηi 回归曲线式，并将其存储于计算机中，则通过计算机容易由 i 值找到相应的 η。至于对应位置 i 值要根据具体条件处理，图4.1-28描述了一种决定 $\eta(\theta)$ 的方法。在平衡加工状态，不同 θ 处的阳极溶解速度 $v_a=v\cos\theta$，由于 v 已知，则可得 $v_a(\theta)$ 关系曲线；而又由 $\eta(i)$ 曲线上对应一组 η、i 值，可计算出对应 $v_a=\eta\omega i$（ω 是确定的），则可以得到 $v_a(i)$ 曲线；将 $v_a(\theta)$、$v_a(i)$、$\eta(i)$ 曲线按坐标置于图4.1-28所示位置，按图中箭头方向，可以由给定的 θ 查出对应的 η 值。以该 η 输入对应电场、流场计算式中，可以用于实际加工条件下的成形规律研究。

4.3.3 电导率、电流效率变化对电场分布的影响

非线性电流效率和电导率的变化均影响电位分布，进而影响电流线分布，其直接的影响则表现在边界条件的改变，即式 $\dfrac{\partial\phi}{\partial n}=\dfrac{\eta_0}{\eta}\dfrac{i_0}{\kappa}\cos\theta$ 所表示的工件型面法向的电位分布中不同

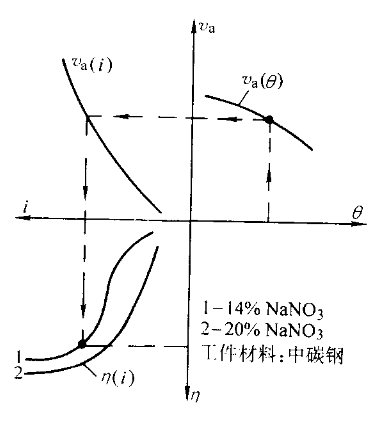


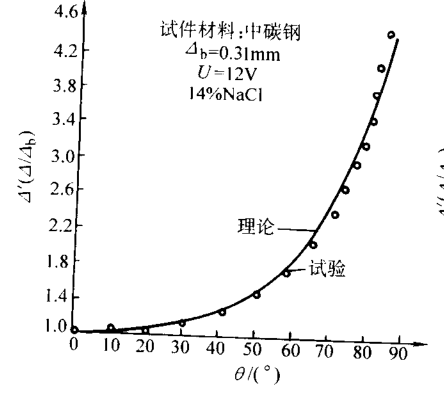
图4.1-28 在平衡加工状态下选取 θ 处的电流效率 η 方法图

的 η、κ 均为变量。相应地，为求电位分布而建立的等价泛函式也有变化。即单元泛函写作

$$I^2(\phi)=\frac{1}{2}\iint\left[\left(\frac{\partial\phi}{\partial x}\right)^2+\left(\frac{\partial\phi}{\partial y}\right)^2\right]\mathrm{d}x\mathrm{d}y-2\frac{\eta_0}{\eta}\frac{i_0}{\kappa}\int\phi\cos\theta\mathrm{d}s \tag{4.1-53}$$

在比较理想的加工过程中，泛函式中 η、κ 为变量，影响泛函式中后一项积分。在应用有限元方法数值求解电场分布时，需要知道所划分的有限元在各个单元上的 η、κ，然后将其代入相应单元的边界条件和单元泛函式中，在计算机上进行数值运算求解。单元上的 η 确定，可以采用图4.1-28中所描述的方法，而对应 κ 的计算，则可以根据气液两相流理论，参见前节介绍的电解加工间隙中的流场计算进行。

总之，非理想电解加工过程的成形规律研究，即电位分布、电流线分布、间隙分布的计算更加复杂，需要全面应用电化学、电场、流场方面的基础理论知识。对于实际电解加工过程中的极化问题，电场的畸变即非线性电位分布的问题，目前还没有好的处理方法，仍然采用在理想加工过程的处理方法，近似认为在电力线方向上，或者说在间隙方向上电位呈线性分布；至于电极极化，则由实验并参考有关经验数据，用一个宏观的平均值——分解电压来代替。如此近似处理，简化了处理问题的过程，在一定范围内、一定条件下对于模型求解精度也没有影响，这已为对比实验结果所验证，如图4.1-29、图4.1-30所示。对比试验结果不仅说明理论求解值与试验加工后的实测值相当吻合，特别是在 $\theta<45°$ 的范围内；但也显示了当 $\theta>45°$ 后，不吻合的差距逐渐增大，其原因既有 $\cos\theta$ 法本身的误差，也因为随着 θ 增大，决定该 θ 处的 η、κ 及 δE 值的误差也随之增大，因而使计算值与实测值的差别增大。这也说明了非理想电解加工的成形规律问题还有待深入研究。



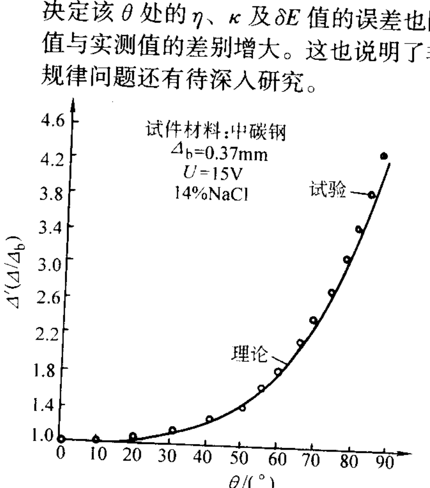
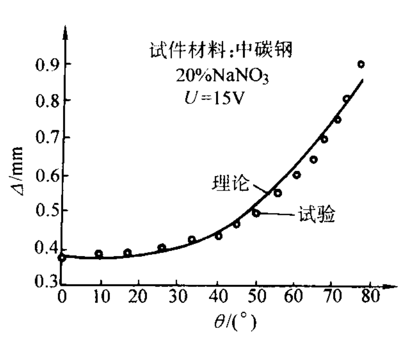


图4.1-29 以14%NaCl电解加工的试验结果与理论计算值比较



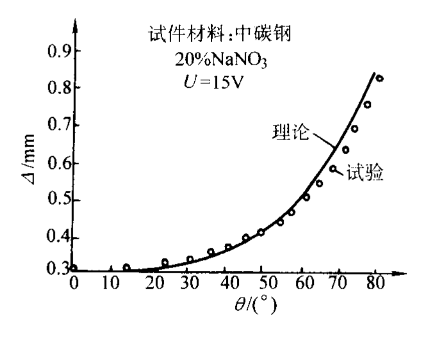


图 4.1-30 以 20% $NaNO_3$ 电解加工的试验结果与理论计算值比较

编写：范植坚（西安工业学院）
康　敏（南京农业大学）
钱　密（南京师范大学）
朱永伟（扬州大学）



第 2 章　电解加工工艺基础

1　电解加工工艺及工艺参数

1.1　电解加工工艺特点

电解加工属于一种非接触加工工艺，加工过程中，工具阴极与工件之间存在着供电解液流动、进行电化学反应、排除电解产物的间隙，这一间隙称为加工间隙。加工间隙与电解液构成了电解加工的核心工艺因素，决定着电解加工工艺指标——加工精度、生产率、表面质量，也是阴极设计及工艺参数选择的主要依据。

前已推导，电解加工间隙 Δ 可按下式计算：

$$\Delta = \frac{\eta\omega(U-\delta E)\kappa}{v_a} \tag{4.2-1}$$

式中，v_a 为阳极（工件）溶解速度，mm/min。

由式（4.2-1），当 $v_a = v_c$，就可以得到估算电解加工平衡间隙的表达式，它是估算工件最终加工形状、尺寸、设计阴极、选用和控制工艺参数的重要依据。

电解加工平衡间隙 Δ_b 的表达式为

$$\Delta_b = \frac{\eta\omega(U-\delta E)\kappa}{v} \tag{4.2-2}$$

式中，v 为阴极进给速度，mm/min。

加工间隙受电场、流场及电化学三大方面多种复杂因素的影响，如图 4.2-1 所示；而图 4.2-2 则表达了加工间隙与诸多影响因素的相互关系。

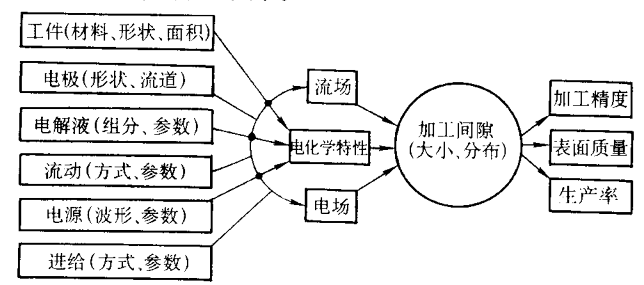


图 4.2-1　影响电解加工间隙的复杂因素

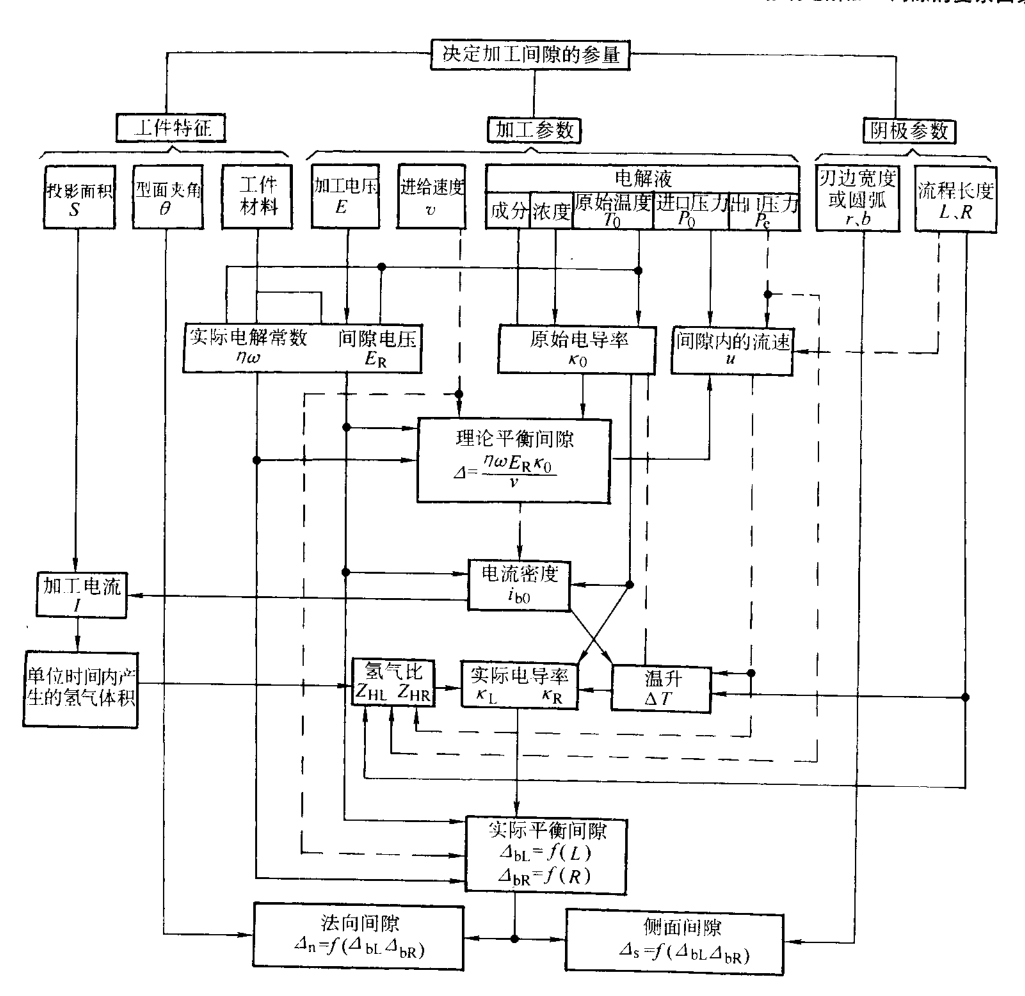


图 4.2-2　加工间隙与影响因素

间隙内电场对加工间隙的影响如图 4.2-3 所示。电场变化是造成加工间隙变化的原动因素，从电场出发求解加工间隙分布规律是最基本的研究方案。在忽略流场和电化学因素不均匀性的前提下，电场分布规律取决于工件和阴极的几何形状，从加工开始到结束，工件几何形状逐渐变化，极间电力线分布也随之逐渐变化，在直流电流、阳极活性溶解过程中，电场分布的不均匀直接导致了加工间隙分布的不均匀。

间隙内流场对加工间隙分布的影响如图 4.2-4 所示。流



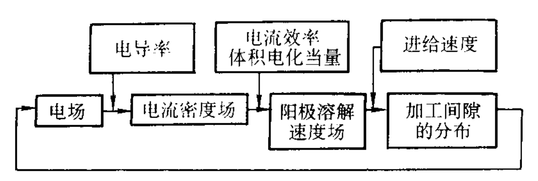


图 4.2-3 电场及加工间隙的关系

场对间隙的影响主要是通过电解液电导率的影响起作用。图 4.2-5 表示在不同的电解液流动形式中氢气泡对加工间隙分布的影响。图 4.2-6 则表示电解液温度场对加工间隙分布的影响。可以看出，这些涉及电解液流场的因素导致了间隙分布的不均匀。为减少流场对间隙不均匀性的影响，工程中通常可以采取施加背压和改进阴极出液槽分布的方式来缩短电解液流程。此外，还可以采取提高电解液流速等工艺措施。

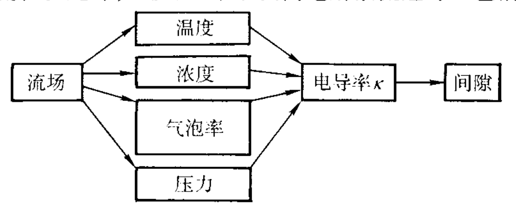


图 4.2-4 流场与加工间隙的关系

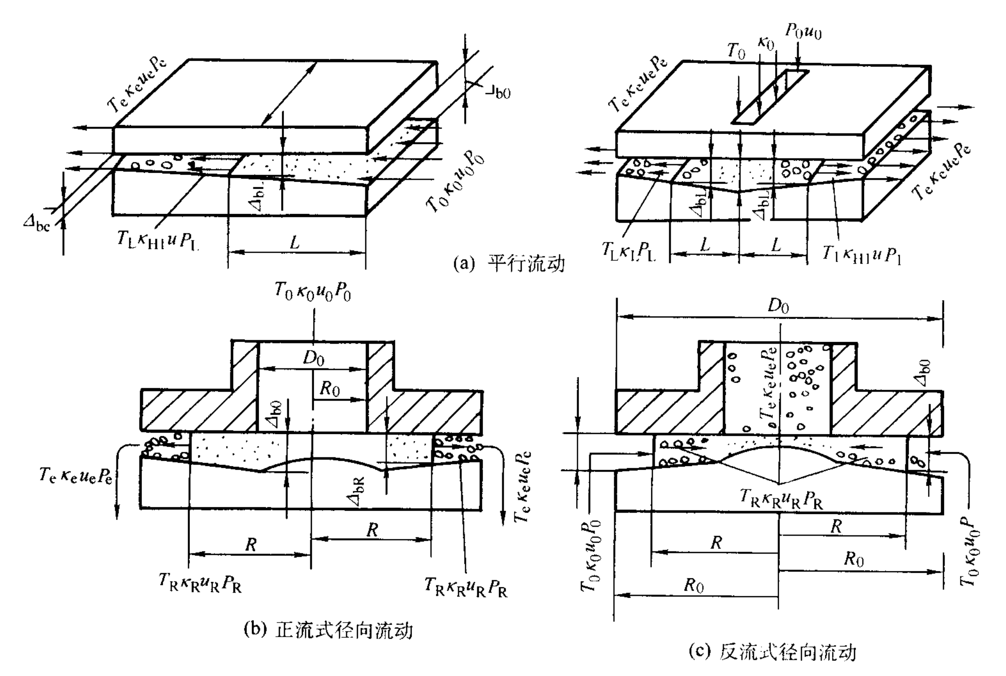


图 4.2-5 氢气泡对加工间隙分布的影响

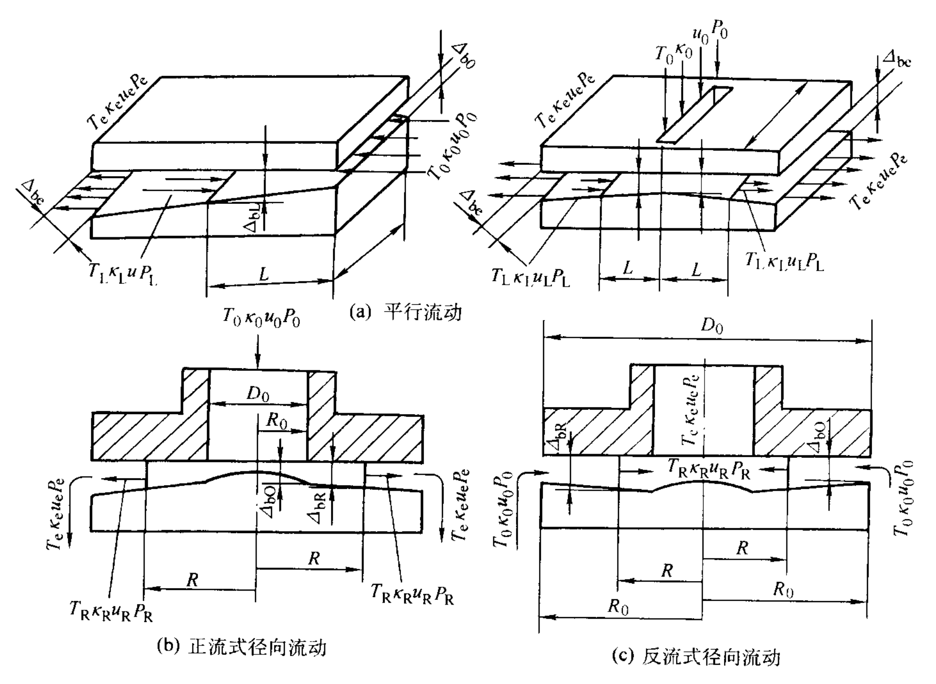


图 4.2-6 电解液温度场对加工间隙分布的影响

锻模型腔加工及叶片型面加工均属于三维复制成形过程，因此设计阴极的重要依据是法向间隙。如第 1 章所介绍，在一定条件下，可用 $\cos\theta$ 法简化估算加工间隙。其表达式为

$$\Delta_n = \Delta_\theta = \frac{\Delta_b}{\cos\theta} \tag{4.2-3}$$

式中，θ 为阴极送进速度 v 与工件表面法向之间的夹角；Δ_b 为对应 $\theta = 0$ 处的平衡加工间隙，通常称为端面平衡间隙；Δ_θ 为对应 θ 处的法向平衡加工间隙。

在孔加工及套料加工中，决定工件尺寸的是侧面间隙，它是设计阴极的依据。使用侧面不绝缘阴极、线性电解液、直流进行电解加工，由于孔的侧壁不存在平衡状态，因此没有截止加工间隙，侧面将二次电解，间隙 Δ_s 可按式（4.2-4）估算：

$$\Delta_s = \sqrt{2\Delta_b vt + x_0^2} \tag{4.2-4}$$

式中，x_0 为阴极最前端处的侧面间隙。

用侧面绝缘阴极加工，此时的侧面间隙可由式（4.2-5）估算：

$$\Delta_s = \sqrt{2\Delta_b b + x_0^2} \tag{4.2-5}$$

式中，b 为阴极工作刃宽度。

平衡间隙公式尽管仅仅从宏观上反映了加工间隙的平均值，视具体应用场合还存在某些限定条件，但目前仍然是最简单、实用的计算公式，因具有较大实用价值而被广泛应用。

表 4.2-1 及表 4.2-2 列出了多种加工条件下目前采用的间隙值范围，可参考选用。

表 4.2-1　不同电解加工方式的加工间隙范围

加工方式		间隙范围/mm
直流电流	活性电解液	0.20 ~ 0.50
	钝性电解液非线性加工、混气加工	0.10 ~ 0.20
脉冲电流	连续进给	0.03 ~ 0.10
	振动进给	0 ~ 0.05
	周期 - 循环多次对刀	0 ~ 0.05

表 4.2-2　不同工序的平衡间隙范围

工序种类	间隙值/mm	
	极限范围	常用范围
孔及型腔加工		
小孔（直径在 8 mm 以下）	0.02 ~ 0.30	0.10 ~ 0.20
小型腔（型面长度 3 ~ 40 mm）	0.08 ~ 0.30	0.15 ~ 0.30
大型腔（型面长度 40 mm 以上）	0.30 ~ 1.00	0.30 ~ 0.50
叶片型面加工		
叶型长度100 mm 以下	0.08 ~ 0.30	0.20 ~ 0.25
100 ~ 200 mm	0.15 ~ 0.50	0.25 ~ 0.30
200 ~ 300 mm	0.30 ~ 0.80	0.30 ~ 0.50
电解车		
预钻通孔	0.20 ~ 0.30	0.20
外表面	0.20 ~ 0.80	0.30 ~ 0.50
电解磨		
使用金属阴极	0.10 ~ 0.80	0.20 ~ 0.30
使用导电砂轮	0.01 ~ 0.08	0.02
电解切割		
用盘形阴极（直径在 100 mm 以下）	0.10 ~ 0.50	0.20 ~ 0.30
用线电极（厚度在 30 mm 以下）	0.10 ~ 0.60	0.20 ~ 0.30

电解加工工艺的核心问题是如何达到均匀、稳定的小间隙，这是获得高精度、高生产率、高表面质量的最根本途径，也是电解加工技术发展所追求的目标。

1.2　电解加工工艺参数及其对加工的影响

电解加工间隙中的电化学、电场、流场诸参数的相互关系相当复杂，并且难以在加工过程中实时采样测试。所以，目前所进行的电解加工理论分析和计算均基于一定的简化及假设，由此给出的指导规律只能是定性的，对影响加工过程的诸多参数的测试、控制，也只能限于自加工间隙之外取得的宏观平均值。当然，这些平均值能够间接反映间隙内部参数的变化规律，所以仍然具有较大的实用价值。

对加工间隙产生主要影响的加工参数有电解液的电导率、加工电压、电流密度、阴极进给速度、电流效率以及电极电位等。

1.2.1　电流密度对加工的影响

电流密度 i 是重要的电解加工参数，它直接影响加工效率，工件表面粗糙度，也间接影响加工精度，特别是使用钝性电解液加工时。

电解加工蚀除速度 v_a 与电流密度的关系为

$$v_a = \eta\omega i \tag{4.2-6}$$

能够看出，在使用 $\eta = 100\%$ 或 $\eta =$ 常数的线性电解液加工时，加工速度与电流密度成线性正比关系；而在非线性加工中，加工速度随电流密度的变化受 $\eta\omega - i$ 特性的影响，在钝化向超钝化过渡区，加工速度以近似成二次方的规律随电流密度增大。

电流密度对表面质量也有重大影响，大多数情况下，表面质量随电流密度的增大而改善。

电流密度对加工精度的影响是：一方面，在一定的电压和电导率条件下，电流密度越高，加工间隙越小，越有利于提高加工精度；另一方面，在钝性电解液非线性加工中，电流密度值处于 ηi 曲线中向超钝化区过渡的斜线段，阳极溶解的集中（定域）蚀除能力强，有利于提高加工精度。

综上所述，一般情况下，电流密度越高，加工效果越好，但有一定的上限。这是由于电流密度越大，极化现象越严重，双电层的反电势随之增大，在电源电压一定时，$U - \delta E$ 将越来越小，限制了电流密度 i 的继续加大；如果电解液流速不够高，浓差极化大到一定程度时，将会阻碍阳极溶解正常进行。另外，电流密度加大，使极间发热量增加，极间电解产物和氢气的析出均会增多，此时相应的间隙却减小，反而使间隙内电解液流阻加大，电解液流量下降，带走热量及电解产物的能力下降，当二者严重失去平衡时，加工区将出现蒸发、沸腾、空穴等异常现象，导致结疤、短路等故障，致使加工中断。因而电流密度的提高应以不破坏上述平衡为前提。所以，对于给定加工条件，电流密度应该有特定的相应最佳上限。

表 4.2-3 列出了直流电解加工电流密度的实用范围。

表 4.2-3 直流电解加工电流密度的实用范围

加工对象	i/A·cm^{-2}	加工对象	i/A·cm^{-2}
大面积型面、型腔	10~30	中小面积型面、型腔	20~100
中小孔、套料	150~400	小孔、套料	200~500

1.2.2 加工电压的影响

加工电压，指电源施加到阴极及工件间的极间电压，它提供建立极间电场使电解加工得以进行的原动能源，用来克服双电层的反电势和溶液欧姆压降，建立必要的极间电流场，确保达到所选用的电流密度。对分解电压较低的电极体系，例如高温耐热合金、铁基合金/金属的活性溶解，其 δE_0 仅为 1~3 V，由于电解液电导率较高，所需的加工电压值较低，一般为 10~15 V；对分解电压较高的电极体系，加工电压就偏高，例如对于钛合金的钝性溶解，其 δE_0 可高达 7 V 左右，此时加工电压一般在 20 V 以上为宜。

在选定电流密度 i 和电解液电导率 κ 的条件下，加工电压 U 越高，加工间隙 Δ 就越大，导致加工误差加大；同时，间隙焦耳热损失加大，能耗增加。因此，只要能确保所需电流密度 i 相应的正常加工条件，加工电压 U 值应尽量选取下限值，以得到正常加工的最小间隙值，并且能耗最低。

在诸多加工参数中，由于电源电压易于调整，且加工电压变化引起间隙变化值的分辨度较高，因而常用调整电压值来达到所要求的间隙值。

1.2.3 电解液流场参数的影响

电解液流场参数指的是电解液流量 Q、压力 P 和温度 T，它们是确保电解加工得以正常进行的必要工艺条件，是基本且重要的参数。选择和确定 Q 和 P 的总原则是确保与选用的 i、Δ 正确匹配，使加工正常、稳定地进行，能及时带走间隙中加工产生的电解产物及热量并去极化，不发生空穴、结疤而导致短路等故障。

从统计数据得出的估算直流电解加工电解液流量的经验公式见式（4.2-7），可供参考。

$$Q = Kq_L I \tag{4.2-7}$$

式中，K 为加工面积、形状系数，见表 4.2-4；q_L 为流量电流比，一般选 0.01 L/（min·A）；I 为加工电流，A。

表 4.2-4 电解液流量的加工面积、形状系数 K

加工情况	K	加工情况	K
简单形状（如浅孔）	1	多个浅孔	1.3
多个浅型腔	1.3~2.3	二维型腔	1.6~1.9
三维型腔	1.5~4	深小孔	3~5
叶片型面	5~7		

注：系数 K 根据国内外实用数据统计归纳得出。

电解液压力值的选取应以确保加工顺利、稳定所需要的流量、流速为原则。由于流量测量较为复杂，且流量的允许变化范围较大，实用中往往以调整压力来达到要求的流量和流速。当前常用的压力范围如表 4.2-5 所列。一般，国内偏下限值选用，国外偏上限值选用。

表 4.2-5 电解液压力选用范围

加工场合	P/MPa
低电流密度及低压混气加工	0.4~0.5
深孔及套料加工	0.8~3.0
高电流密度及高压混气加工	1~2

电解液温度是确保阳极溶解过程正常进行和设备正常运转的另一必要条件。温度过低时阳极表面易钝化、结疤，使加工无法正常进行；过高则局部电解液可能沸腾、蒸发，导致局部出现空穴现象，使该处加工中止。两种情况均易导致短路、烧伤，并有可能引起工装乃至工作箱热变形过大，造成电解液泄漏及工件、阴极定位精度下降。实践表明，电解加工高温耐热合金及铁基合金、结构钢等材料，液温以 20~40℃为宜，但使用 NaCl 电解液加工钛合金则要求在 40℃以上方能得到理想表面。

从加工精度出发，为了防止由于液温变化引起 κ 变化从而导致 Δ 变化，希望采取恒液温加工。另一方面，在钝性电解加工中，液温变化还会引起 η 的变化，也将导致 Δ 的变化。

1.3 工艺参数的选择

综上所述，确定电解加工参数的顺序为：先选定加工间隙、阴极进给速度，然后定电流密度，最后再选定相应的加工电压及电解液参数。

优选加工参数的原则应依据具体加工要求以及工件特点而定，同时还应考虑设备条件。

对于以加工效率为主要要求的尺寸加工，以及以降低表面粗糙度为主要要求的抛光加工，一般应采用高参数、较大间隙的加工方式，即较高的进给速度、电流密度、加工电压及电解液流量，相应设备的要求为容量大（电源电压较高，总电流容量大，泵压高、流量较大等），但设备精度和刚性及溶液净化程度均适中即可。对以加工精度为主要要求的精密加工以及套料、孔加工，则应采取高参数、小间隙加工方式，除采用较高的进给速度、电流密度外，还要求较高的电解液压力，但电压及电解液流量则较低。高频、窄脉冲电流电解精密加工，应采用高参数、小间隙加工方式，但电解液压力和流量适中即可。同样，对以加工精度为主要要求但使用钝性电解液或混气电解加工时，则应采用低参数、小间隙加工方式，即较低的进给速度、电流密度、电解液流量，但加工电压较高，前者是因较高的阳极过电位引起，后者则由较高的间隙欧姆压降引起。对于特大型的模具、叶片加工，限于电源容量（目前国外电源最大容量为 4 万安培），只能采用低参数加工。

近年发展的低浓度电解液，由于电导率较低，只能采用偏低的参数加工。

对小间隙加工，特别是高参数、小间隙加工，要求相应的设备条件好，即机床刚性强，进给速度特性“硬”，运动机构精度高，机、电、液系统参数稳定性好，电解液净化程度高，自动控制系统较完善，电源容量较大等。

一般说来，国外电解加工设备条件较好，且对加工效率要求较高，因而采用高参数加工居多，国内则相反，以低参数居多。

表 4.2-6 列出了目前国内外常采用的进给速度范围供参考选用。在选择加工参数时，可以从图 4.2-7 近似估算进给速度和加工电流。

表 4.2-6 常用的电解加工进给速度范围

加工场合	阴极进给速度 v/mm·min^{-1}
大面积型面、型腔	0.15~0.80
中小型面型腔	0.30~2.50
中大尺寸孔、套料	1.50~5.0
小尺寸孔、套料	2.50~10.0

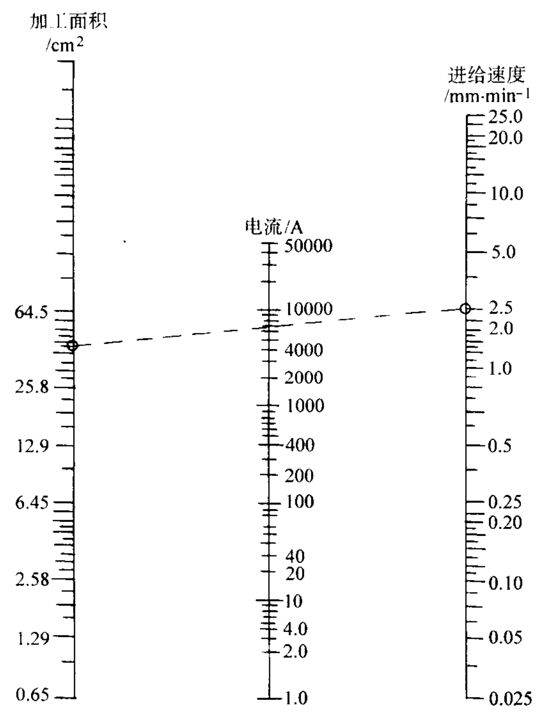


图 4.2-7　近似估算进给速度与加工电流的列线图

2　电解液

2.1　电解液的作用、要求及分类

2.1.1　电解液的作用

电解液是电解池的基本组成部分，是电解加工产生阳极溶解的载体。正确地选用电解液是实现电解加工的基本条件。

电解液的主要作用如下。

1）与工件及阴极组成进行电化学反应的电极体系，实现所要求的电解加工过程，同时，电解液所含导电离子是电解池中传送电流的介质，这是其最基本的作用。

2）排除电解产物，控制极化，使阳极溶解能正常、连续进行。

3）及时带走电解加工过程中所产生的热量，使加工区不致过热而引起沸腾、蒸发，以确保正常的加工。

2.1.2　对电解液的要求

对电解液总的要求是加工精度和效率高、加工表面质量好、实用性强。随着电解加工的发展，对电解液不断提出新的要求，根据不同的目的，要求可能不同甚至相互矛盾。对电解液的基本要求包括以下四个主要方面（见表 4.2-7）。

表 4.2-7　对电解液的基本要求

性能	基　本　要　求
电化学特性	1）电解液中各种正负离子必须并存，相互间只有可逆反应而不相互影响，这是构成电解液的基本条件 2）在工件上必须能优先进行金属离子的阳极溶解，不生成难溶性钝化膜（如蓝紫膜等），以免阻碍溶解过程。因此，电解液中的阴离子常是标准电极电位很正的 F^-、Cl^-、ClO_3^-、NO_3^- 等离子 3）对电解抛光，应能在阳极表面生成可溶性覆盖膜，产生不完全钝化（又称准钝化），以获得均匀、光滑的表面 4）阴极上只发生析氢反应，金属阳离子不会沉积在阴极表面，以免破坏阴极型面而影响加工精度。因此，电解液中的阳离子常是标准电极电位很负的 Na^+、K^+、NH_4^+ 等离子

续表 4.2-7

性能	基　本　要　求
电化学特性	5）集中蚀除能力①强、散蚀能力②弱。集中蚀除能力是影响成形速度/整平比从而影响加工精度的重大关键因素之一。散蚀能力则影响侧壁的二次电解、转接圆角半径的大小、棱边锐度以及非加工面的杂散腐蚀 6）阳极反应的最终产物应能形成不溶性氢氧化物，以便于净化处理，且不影响电极过程，故常采用中性盐电解液。但在某些特殊情况下（如深细小孔加工），为避免在间隙区出现沉淀异物，则要求能产生易溶性氢氧化物，此时需选用酸性电解液
物理特性	1）溶质应是强电解质，即溶解度高、离解度大。一般用于尺寸加工的电解液应具有高电导率，以减少高电流密度（高去除率）下的电能损耗和发热量。精加工时可采用低浓度、低电导率电解液，以利于提高加工精度 2）黏度尽可能低，以减少流动压力损失及加快电解产物与热量的迁移过程，利于实现小间隙加工 3）比热容高，以减小温升，防止沸腾、蒸发及形成空穴，有利于实现小间隙、高电流密度加工
稳定性	1）电解液中消耗性组分应尽量少（因电解产物不易离解），应有足够的缓冲容量以保持稳定的最佳 pH 值（酸碱度） 2）电导率及黏度的温度系数应尽可能小
实用性	1）价格低廉，易于采购 2）使用寿命长 3）污染少，腐蚀性小；无毒、安全，应尽量避免产生 Cr^{6+} 及 NO_2^- 等有害离子

①　集中蚀除能力，又称定域能力，指工件加工区小间隙处与大间隙处阳极溶解能力的差异程度，即加工区阳极蚀除量集中在小间隙处的程度。

②　散蚀能力，指大间隙处阳极金属蚀除的能力，即加工区阳极蚀除量发散的程度。

2.1.3　电解液的类型

电解液的类型见表 4.2-8 所列。

表 4.2-8　电解液类型

按酸碱度分类	按组成分类	按浓度分类
中性电解液： 活性——卤素族盐，如 NaCl 钝性——含氧酸族盐，如 $NaNO_3$、$NaClO_3$ 等	单一组分电解液	高浓度电解液
酸性电解液：H_2SO_4、HCl 等无机酸水溶液 碱性电解液：NaOH	复合电解液	低浓度电解液（浓度≤10%）

2.2　电解液选择原则及常用电解液

2.2.1　电解液选择的原则

综上所述，对电解液的要求是多方面的，很难找到一种电解液同时能满足所有要求，因此只能针对性地根据被加工材料的特性及主要加工要求（加工精度、表面质量和加工生产率）有所侧重。对粗加工，电解液的选择侧重于解决加工生产率问题；对精加工，则侧重于解决加工精度和表面质量问题。例如高温合金叶片侧重确保加工精度，而钛合金叶片则侧重于表面质量。总之，在电解液优选中，除共性的原则外还有针对不同情况的特殊优选原则。表 4.2-9 为优选电解液应考虑的主要原则。



表 4.2-9 选择电解液的原则

选择内容	类别	特 点	使用范围
类型	中性电解液	1）组分不消耗，净化后可循环使用，寿命长 2）腐蚀性小 3）安全可靠 4）经济性好 5）电解产物为氢氧化物，不溶解，要进行净化处理（见表 4.2-10）	1）应用范围最广，型面、型腔、型孔均可用 2）早期美国多用 NaCl，现英、美多采用 $NaNO_3$
	酸性电解液	1）电导率高 2）能溶解电解产物，有利于其排除 3）腐蚀性大，对设备及人体危害较大 4）使用过程中成分变化大	主要用于微孔、深细小孔和电液束加工
	碱性电解液	1）加工钨、钼等类金属时，其氯化物可以与氢氧化物作用生成可溶性钨酸或钼酸 2）在此类电解液中，一般常用金属表面产生致密的不溶性钝化膜，使工件表面难以溶解，故不能用此类电解液 3）对金属无腐蚀作用，但对人体危害较大	1）加工钨、钼 2）作附加添加剂，增强对碳化物相的溶解
组分	卤素族盐	1）卤素族盐属活性电解液，其阴离子主要起活化阳极表面的作用，活化能力的顺序为 $Cl^- > Br^- > I^- > F^-$ 2）Cl^- 可使阳极表面完全活化，获得高电流密度、高电流效率 3）在钛合金电解加工中，由于钛的自钝化能力强，因而必须采用活化性强的卤素族盐，其中以 Br^- 和 I^- 击穿钛自钝化膜能力最强，在一般浓度、温度、电压下均是如此	1）在要求生产率为主的加工中，广泛采用 NaCl 2）在钛合金电解加工中，应用 NaBr、KBr 较多
	含氧酸盐	1）含氧酸盐属氧化剂，为钝性电解液，对阳极表面起氧化/钝化作用，对马氏体不锈钢及铁基合金钝化作用最强，提高了其超钝化电位，同时还降低了析氧电位，在低电流密度下大量析氧，因而非线性效果显著 2）含氧酸盐对镍、铬合金、钛合金等抗氧化能力强的金属钝化作用较弱，低电流密度下析氧甚微，因而在直流加工时非线性效果不明显。但仍能生成可溶性保护膜改善阳极溶解的均匀性，从而改善表面质量	1）用于马氏体不锈钢及铁基合金的精密加工 2）加工镍、铬合金、钛合金可改善表面质量
	单一组分电解液	1）使用性能较稳定 2）调整浓度较简单 3）对电解加工性较差的材料如钛合金等，加工效果较差	广泛用于生产
	复合电解液	1）可以针对不同加工要求调整其组分，以得到较佳的加工性能，例如加工铁基合金的非线性效应，加工钛基合金的活化效应等 2）组分调整较复杂 3）使用性能不如单一组分电解液稳定，需经常调整	已成为电解液应用的发展趋势，广泛用在钛合金、铁基合金加工中，效果良好
浓度	高浓度电解液	1）电导率高，可以采用高电流密度、高参数，达到高效加工 2）散蚀能力强，加工精度较低，杂散腐蚀较重	用于粗加工、半精加工
	低浓度电解液（浓度 ≤10%）	1）散蚀能力弱，加工精度高，杂散腐蚀轻 2）活化能力较强，加工钛合金效果较好 3）电导率较低，故应用电流密度低，只能用低参数，效率较低	用于精加工及钛合金加工

2.2.2 常用电解液

目前生产实践中常用的电解液为中性电解液 NaCl、$NaNO_3$ 及 $NaClO_3$ 三种。三种电解液的性能、特点及应用范围见表 4.2-10。

表 4.2-10 三种常用电解液的性能、特点及应用范围

项 目	NaCl	$NaNO_3$	$NaClO_3$
常用浓度	250 g/L 以内	400 g/L 以内	450 g/L 以内
电流效率 η、实际体积电化当量	参见表 4.1-4		
表面粗糙度	与电流密度，流速及加工材料有关，一般为 $R_a = 0.8 \sim 6.3\ \mu m$	在同样条件下低于 NaCl 电解液	一般情况下低于 NaCl 和 $NaNO_3$ 电解液
加工精度	较低	较高	高
表面质量	加工镍基合金易产生晶间腐蚀，加工钛合金易产生点蚀	一般不产生晶间腐蚀，但电流密度低时也会产生点蚀	杂散腐蚀最小，一般也不会产生点蚀，已加工面耐蚀性较好

续表 4.2-10

项　　目	NaCl	$NaNO_3$	$NaClO_3$
腐蚀性	强	较弱	弱
安全性	安全、无毒	助燃（氧化剂）	助燃（强氧化剂）
稳定性	加工过程较稳定，组分及性能基本不变	加工过程中 pH 值缓慢增加，应定时调整，使之≤9	加工过程中缓慢分解，Cl^- 增加，ClO_3^- 减少，故加工一段时间后要适当补充电解质
相对成本	$NaCl : NaNO_3 : NaClO_3 = 2:5:12$		
应用范围	加工精度要求不很高的铁基、镍基、钴基合金等，应用范围最广	加工精度要求较高的铁基、镍基、钴基合金、有色金属（铜、铝等）	加工精度要求较高的零件；固定阴极加工

从表 4.2-10 可以看出：NaCl 电解液的优点是高效、稳定、成本低、通用性好，早期得到普遍应用，其缺点是加工精度不够高，对设备腐蚀性较大；$NaNO_3$ 电解液优点是加工精度较高、对设备腐蚀性较小，缺点是加工效率较低，$NaNO_3$ 的应用面也比较宽，是英国 R.R. 公司的标准电解液。$NaClO_3$ 电解液虽然加工精度高，电解加工技术发展初期使用较多，但成本较高，使用过程较复杂，干燥状态易燃，因而未能广泛应用。

2.2.3　低浓度复合电解液

近年开发的低浓度复合电解液在改善钛合金加工、镍基铸造合金的表面质量、提高铁基合金或金属的加工精度方面效果显著。

（1）钛合金、镍基铸造合金加工用电解液

近年，新型航空发动机冷端零件大量采用钛合金制造，其切削加工性较差，电解加工则是理想的工艺选择，目前已大量采用。由于钛合金的自钝化性较强，电解加工时阳极表面易生成一层致密的氧化膜，因而钛的电解加工一般是在此氧化膜下从点蚀开始，然后扩大到整个表面，加工过程是钝化、活化交替发生。如果钝化过强，交替过程迟滞，就不能较快地达到全面、均匀的蚀除；如果活化过强，产生浸蚀性的强活化效应，则出现选择性斑点腐蚀，二者均得不到均匀、光整的表面。上述自钝化特性使分解电压 δE_0 值显著增大，可高达 6 ~ 7 V（一般金属仅为 1 ~ 2 V），另一方面，从加电到阳极开始全面溶解的活化时间 t_a 较长，采用传统的高浓度 NaCl 或 $NaNO_3$ 电解液时上述问题较为严重，难以得到光整表面。采用对钛合金活化能力最强的高浓度 Br^- 盐，δE_0 较小，t_a 较短，加工表面质量较好，但成本较高。试验研究表明，采用配比得当的低浓度复合电解液可以显著降低 δE_0（见表 4.2-11）和 t_a（见图 4.2-8），从而以较小的能量较快地达到均匀、全面活化，获得好的表面质量（见表 4.2-11）。此外，其最小可加工电流密度 i 也较低，可再次加工的最小余量也较小，加工稳定性好。这类电解液已在叶片型面加工中广为采用，效果甚佳。但因电导率较低，可达到的最大电流密度较小，所以对二维型面套料加工（如整体叶轮、型孔等）及深孔加工不宜采用。

表 4.2-11　钛合金加工优选复合电解液的性能

电解液	δE/V	$\eta\kappa$ /mg·(A·min)$^{-1}$	R_a/μm	i/A·cm^{-2}	一次加工稳定性	再次加工最小余量/mm
5.8% $NaNO_3$ + 2.3% NaCl	3.5 ~ 4	10	0.8	≥5	稳定	0.06
18% $NaNO_3$ + 6% NaCl	6 ~ 7	10	3.2	≥10	较稳定	0.15
12% $NaNO_3$ + 8% NaCl	8 ~ 9	9	12.5 ~ 6.3	≥10	较差	0.30
5% $NaClO_3$ + 3% NaCl	3.5	9 ~ 9.5	0.8	≥3	稳定	0.06
15% $NaClO_3$ + 8% NaCl	6	9 ~ 9.5	1.6	≥8	较稳定	0.10
15% $NaClO_3$ + 2% NaCl	7	9 ~ 9.5	6.3 ~ 3.2	≥3	较差	0.20
4% KBr + 4% NaCl	1 ~ 2.5	8	1.6	≥3	稳定	0.05
10% KBr + 10% NaCl	1.75 ~ 2.70	8	3.2 ~ 1.6	≥3	稳定	0.05

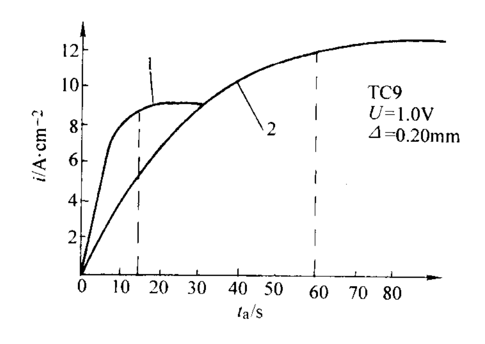


图 4.2-8　电解活化时间 t_a

1—5.6% $NaNO_3$ + 2.4% NaCl；2—6.4% $NaNO_3$ + 2% NaCl

新型航空发动机热端零件大量采用铸造高温耐热合金。当前我国的精铸毛坯尚需留有一定余量，这种毛坯很难用其他方法加工，手工打磨效率低、质量不稳定，电解加工较为适宜，但由于其金相组织较复杂，晶粒较粗，表面微观理化性能不均匀，因此使用传统的电解液难以获得满意的表面质量，表 4.2-12 所列的低浓度电解液较好地解决了此问题。此类电解液 η 为常数，无非线性效应，因而不能由此提高精度；但由于低浓度电解液 δE_0 值低，活化效应强，黏度低，对流场敏感性弱，所以有利于实现小间隙加工，从而可以在不降低加工效率的前提下提高加工精度，这已为镍基铸造合金叶片的生产应用所证实。

表 4.2-12 镍基铸造合金加工电解液及其表面粗糙度

电解液	流速/$m\cdot s^{-1}$	$R_a/\mu m$	电解液	流速/$m\cdot s^{-1}$	$R_a/\mu m$
20% $NaNO_3$	8	12.5	20% $NaNO_3$	40	12.5～6.3
30% $NaClO_3$	8	12.5	30% $NaClO_3$	40	12.5
14%～18% NaCl	8	6.3～3.2	14%～18% NaCl	40	3.2
3.5%～7% NaCl	8	3.2	3.5%～7% NaCl	40	3.2～1.6
3.5% NaCl + 0.3% NaF	8	1.6	3.5% NaCl + 0.3% NaF	40	1.6～0.8
3.5% NaCl + 0.3% NaF + 5% $K_3C_6H_5O_7$	8	0.8	3.5% NaCl + 0.3% NaF + 5% $K_3C_6H_5O_7$	40	0.8 以下

（2）模具钢、不锈钢、铁基合金加工用电解液

早期试验研究表明，模具钢、不锈钢及铁基耐热合金在直流钝性电解液（如 $NaNO_3$、$NaClO_3$）中阳极溶解时，η-i 曲线呈非线性，集中蚀除能力较强，因而较活性电解液的加工精度高。近年的试验研究又表明，采用低浓度钝性电解液加工时，超钝化区曲线斜率进一步加大，η-i 曲线移向高电流密度区，切断电流密度 i_0 加大，相应的截止加工间隙 Δ_0 缩小，因而集中蚀除能力进一步加强，加工精度进一步提高。

但是，钝性电解液浓度较低时最大电流效率也较低，例如在 50℃时 4% $NaNO_3$ 加工软钢只有 40%，而高浓度电解液例如 20%～30% $NaNO_3$ 的 η 一般能达 80%以上；10%～15% NaCl 则接近 100%。另一方面，低浓度 $NaNO_3$ 电解液的电导率显著下降，例如 20% $NaNO_3$ 水溶液 κ 为 0.171（$\Omega\cdot cm$），而相同条件下 4% $NaNO_3$ 仅为 0.048（$\Omega\cdot cm$），因此 i 减小而 v_a 以接近二次方的速率下降（$v_a = \eta\omega i$），导致生产率降低，且极间欧姆压降大，造成热损加大。

研究表明，在低浓度钝性电解液中添加适当的添加剂，组成配方适宜的复合电解液，可提高其电流效率和电导率。例如，加工 2Cr13 时，在 4% $NaNO_3$ 中添加 2% $NaClO_3$，综合加工效果颇佳，在保证加工精度的同时，也提高了加工效率（如图 4.2-9 所示）。加工试验还表明，再添加 2% Na_2SO_4 后，虽然对 2Cr13 尺寸精度无影响，却可提高加工速度，并可减少以至消除溶液中的 $Cr_2O_7^{2-}$，减少环境污染，综合效果更好。此外，6% $NaNO_3$ + 2% Na_2SO_4 加工 5CrNiMo；4%～5% $NaNO_3$ + 2% Na_2SO_4 以及 8% $NaNO_3$ 加工 3Cr2W8V 时均有良好的尺寸加工精度。

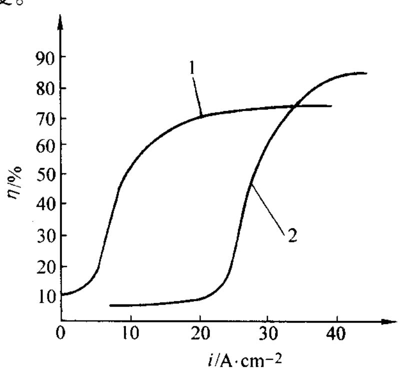


图 4.2-9 不同电解液加工 2Cr13 时的 η-i 曲线对比

1—4% $NaNO_3$；2—4% $NaNO_3$ + 2% $NaClO_3$

从总体来看，上述低浓度复合电解液的优点在组分优选及与加工材料匹配得当的条件下才能发挥出来，其缺点主要是电导率较低，使加工速度较低，还有加工过程中组分变化的适时测量、控制等问题尚有待进一步研究解决。

2.2.4 常用材料加工电解液配方举例

如前所述，电解液必须依照加工材料配合选用，并与加工条件、加工要求有关，因此应根据具体情况选定。表 4.2-13 列举了一些应用较多但并非唯一的配方，供选用时参考。

表 4.2-13 常用材料加工的电解液配方

加工材料	电解液配方示例	加工材料	电解液配方示例
碳素结构钢 低合金钢	7%～18% NaCl（最高可用到 25%） ①20%～30% $NaNO_3$（最高可用到 40%） ②20% $NaNO_3$ +（3%～10%）$NaClO_3$	钛合金	①6% $NaNO_3$ + 2% NaCl ②4% NaBr + 4% NaCl ③5% $NaClO_3$ + 3% NaCl ④1.6% $NaNO_3$ + 5% NaCl ⑤10% NaBr + 10% NaCl ⑥（12%～25%）$NaNO_3$ +（4%～8%）NaCl ⑦15% $NaClO_3$ +（6%～8%）NaCl ⑧（12%～18%）NaCl
马氏体不锈钢 模具钢 铁基合金	10% $NaNO_3$ + 10% NaCl ① 4% $NaNO_3$ + 2% $NaClO_3$ + 2% Na_2SO_4（2Cr13，5CrNiMo） ②6% $NaNO_3$ + 2% Na_2SO_4（5CrNiMo） ③4% $NaNO_3$ + 2% Na_2SO_4（3Cr2W8V） ①（4%～5%）$NaNO_3$ + 2% Na_2SO_4 ②（20%～30%）$NaNO_3$ ③（7%～18%）NaCl	奥氏体不锈钢 镍基合金 钴基合金	10% $NaNO_3$ + 10% NaCl 20%～40% $NaNO_3$（精加工可用到 7%） 18%～25% NaCl
铜合金	①30% $NaNO_3$ ②（20%～25%）$NaNO_3$ +（3%～5%）NaCl	铝合金	15%～20% $NaNO_3$（锻铝） 10% $NaNO_3$（铸铝）

续表 4.2-13

加工材料	电解液配方示例	加工材料	电解液配方示例
硬质合金	(8%～16%) NaOH + 2% NaCl + (8%～16%) $H_2C_4H_4O_5$ + (0.2%～0.5%) CrO_3	铸造高温合金	①3.5%～7% NaCl ②3.5% NaCl + 0.3% NaF ③3.5% NaCl + 0.3% NaF + + 5% $K_3C_6H_5O_7$

注：1. 镍、钴基高温合金易产生晶间腐蚀，故采用含氧酸盐居多，采用含氧酸盐与氯盐的复合电解液综合性能较好。
2. 钛合金型面、型腔加工选用低浓度复合电解液为宜，打孔、套料则以高浓度为好。
3. 加工铝、铜合金选用 $NaNO_3$ 电解液可降低表面粗糙度。
4. 硬质合金电解加工必须采用能使 WC 和 Co 都分别溶解的 NaCl 和 NaOH 复合电解液。
5. 粗加工时浓度应偏上限选取，精加工时则偏下限选取。

2.3 混气电解加工及混气电解液

混气电解加工，就是将一定压力的气体（通常为压缩空气，也可为二氧化碳、氮气等）与电解液混合，使电解液成为气、液两相混合物，然后输入加工区进行电解加工。因此，混气电解加工的电解液，实质上是混合均匀的气液两相流体。

2.3.1 混气电解液的特点

混气电解液的气液两相流进入加工间隙后，会影响间隙内的流场分布、电导率分布及电化学反应过程，从而进一步影响间隙内的电流密度分布，由此影响电解加工成形精度（特别是复制精度）和生产率。混气电解液具有以下特点。

（1）改善电解液流场

对一般电解加工，电解液被认为是不可压缩的流体，流速与间隙截面积（过水面积）成反比，即间隙截面积大处流速低，间隙截面积小处流速高，间隙截面积急剧变化，则电解液流速也会急剧变化。混气电解加工由于电解液中混入气体的作用，根据气液两相流动理论分析，气体膨胀、压缩和密度的变化影响气液两相流动特性的变化，对于改善间隙中电解液流场有着明显影响。

1）改善流场的均匀性　混气电解加工中，由于气体的强烈“搅拌”作用以及气体的膨胀效应，在低压区由于气相膨胀使局部压力相对升高，从而有利于防止空穴现象及涡流区、死水区的产生，有利于改善间隙中电解液流动均匀性，提高加工工件的表面质量。

2）有利于提高流速　提高加工间隙中的电解液流速，对于排除电解产物、带走电解过程所产生的热量都是非常必要的。但流速过快，又容易产生流动不均匀，局部区域可能出现火花短路或产生流纹。在混气电解加工中，在截面积大的局部，气相体积会相应膨胀，使气液两相体积流量相对增大而使流速相对提高；另一方面，由于空气的密度、黏度比电解液的密度和黏度低得多，则气液两相混合物的密度和黏度远比纯电解液要低，因而流过间隙通道的流体阻力就小，故可用较低的电解液进口压力得到较高的极间电解液流速。简言之，气液两相流动容易得到更高的流速。

（2）对电导率分布的影响

1）使电导率沿流程变化趋于均匀　气液两相介质的电导率由温度 T 和气泡率 β 所决定，即

$$\kappa(x) = \kappa_0[1 + \xi(T(x) - T_0)][1 - \beta(x)]^n \quad (4.2\text{-}8)$$

一般电解加工，电解液温度沿流程增高，相应电导率也沿流程渐增；由于阴极表面析出氢气沿流程积累，含氢气量即气泡率沿流程也逐渐增加，则电导率逐渐下降；温度 $T(x)$ 和气泡率 $\beta(x)$ 综合作用，在间隙进口处温升占优，故电导率略微增大；而接近间隙出口端，气泡率影响占优，故电导率往出口端逐渐减小，接近出口时降低很多。相应地，加工间隙也沿流程逐渐改变，意味着将影响电解加工的成形精度。对于混气电解加工，混入的气体流量比电解过程析出氢气的含量大得多，因此，混气电解液的电导率主要由混入气体流量所决定。总的趋势是，混气电解中气液两相介质的电导率随气泡率增加而降低，但沿流程变化不大，趋于均匀分布，故有利于提高复制精度。

2）使得气液两相混合物的电导率随间隙变化而自行变化，可以显著提高电解整平能力　假设混入的气体质量流量沿流程保持为常数，则在小间隙处气体被压缩，相应气体体积流量减小，该处气泡率也减小，导致小间隙处电阻减小即电导率增大，相应电流密度增大而使电解去除速度加快；而在大间隙处，气体膨胀，气泡率增加，使得电阻增大即电导率减小，电流密度减小，电解去除速度降低。小间隙处加工速度快，大间隙处加工速度慢，因而可以显著提高电解加工的整平能力，即减小工件毛坯遗传误差的影响。

（3）对电极反应过程的影响

在电解加工过程中，离子往往集聚在电极表面形成“离子粘附”。如果电极表面“离子粘附”越多，导致浓差极化越严重；如果电极表面“离子粘附”不均匀，导致浓差极化不均匀；浓差极化严重使得电流密度降低，浓差极化不均匀也导致电流密度分布不均匀，结果都会影响加工速度的分布，从而影响电解加工精度和表面质量。

当电解液中混入气体后，气相的冲刷及强烈扰动可以有效地消除电极上的“离子粘附”，从而减小浓差极化，或使极化趋于均匀，进而使加工电流密度分布趋于均匀，有利于提高复制精度。

由于混气电解液具有上述特点，保证了混气电解加工容易实现小间隙加工，从而提高加工精度；其整平能力强，可减小遗传误差，提高复制精度。

2.3.2 混气电解加工工艺参数的选择

混气电解加工中，加工电压、电流密度、进给速度、平衡间隙等工艺参数对加工精度、生产率的影响规律及选用原则都与纯液电解加工基本一致。结合混气电解加工的特点讨论工艺参数选择的一般原则如下。

（1）电解液成分、气液混合比及有关参数

混气电解具有均匀流场、缩小加工间隙、提高整平能力等特点，故混气电解加工中常用 NaCl 电解液，而不用价格高、电流效率偏低、在加工过程中会损耗的 $NaNO_3$、$NaClO_3$ 电解液。当然，对于加工某些特殊材料，可以在此基础上添加适量其他组分的添加剂。例如，钛合金叶片电解加工，可在 NaCl 电解液中添加适量柠檬酸等酸性添加剂，或采用低浓度的 NaCl、$NaNO_3$ 混合电解液再混气，以提高加工速度，改善表面质量，特别是防止产生点蚀。对于精度要求较高的工件也有采用 $NaNO_3$ 电解液高压混气电解加工的。

混气电解加工采用的 NaCl 溶液质量百分浓度范围在 7%～10%，温度范围控制在 20～40℃，一般在 30℃以下最佳，此时电导率大致在 0.1～0.15 $(\Omega\cdot cm)^{-1}$ 范围内。低浓度、低电导率本身就能够提高复制精度，混气后其整平能

力、复制精度进一步提高。但混气后电导率更低，为了保持一定的加工速度，往往提高加工电压或增加电解液浓度，如选用15%浓度的NaCl电解液加工镍基耐热合金涡轮叶片和铁基耐热合金压气机叶片。

气液混合比 Z 是混入气体的体积流量 Q_g 与电解液液体体积流量 Q_l 之比，即

$$Z = Q_g / Q_l$$

气液混合比的选择主要取决于工件毛坯余量大小及余量差，更确切地讲取决于加工需要的整平比大小，余量差大，需要的整平能力强，则需选择高气液混合比。一般情况，气液混合比选择 $Z = 1/1 \sim 3/1$，对于余量分布特别不均匀的毛坯加工，可能需要选择 $Z = 5/1 \sim 7/1$。

确定气液混合比的直接参量是液体体积流量 Q_l 和气体体积流量 Q_g，还受供气压力和加工间隙中气液混合介质压力的影响。要特别指出的是，在气液混合器和加工间隙已经确定的情况下，气体体积流量、液体体积流量均由供气、供液压力所决定。在实际生产中，用调节气压、液压来调节其相应流量。故供液压力、供气压力也同样作为混气电解加工中的一个特征参数，即在生产现场并不随时都在测量气、液流量，而只要控制气、液压力就可以了。在气液管道系统中分别在混合器前安装液压表、气压表，在混合器后安装气液混合介质压力表，用以测量、显示相应压力，据此可以适当调节气、液压力以调节气液混合比。在通常气液混合比 $Z = 1/1 \sim 3/1$ 的范围内，液压 0.4 ~ 0.6 MPa，气压 0.35 ~ 0.55 MPa，混合后压力为 0.3 ~ 0.5 MPa（以上均为表压）。调节过程中，气压一般比液压低 0.05 MPa 或更低，视气液混合比而定；混合后压力一般比气压低 0.05 MPa，由小孔流阻所决定。

(2) 加工电参数、阴极送进速度和加工间隙

由于混气电解加工一般采用NaCl电解液，所加工的工件大多为锻模、叶片型面，材料通常为铁基、镍基合金，故分解电压都不高，大约在 0 ~ 3 V 之间。为此，混气电解加工的加工电压（电源电压）大都选择在 12 ~ 16 V 范围内；只有在钛合金加工中，由于分解电压高达 5 ~ 7 V，故加工电压在 16 ~ 20 V 范围内选择。

由于混气电解液电导率 κ 降低，据有关计算式

$$i = \kappa \frac{U - \delta E}{\Delta}$$

可知，混入气体可实现小间隙加工，即式中 Δ 减小。尽管 κ 减小，但由于 Δ 减小仍可保持电流密度 i 大致不变，即保持加工速度不变。换言之，由于混气电解加工容易达到比纯液电解加工更小的平衡间隙，可接近于纯液加工时的阴极进给速度。但有时间隙 Δ 并不一定随电导率 κ 同比例减小，电流密度略有降低，即电解加工速度略有降低。为了接近于纯液电解加工速度，相应地要选择比纯液电解加工略高 2 ~ 3 V 的加工电压。

混气电解加工产生于20世纪60年代末，当时在提高电解加工定域性（集中蚀除能力）、提高整平比，从而在提高加工精度方面发挥了积极作用，在随后的20来年得到迅速发展，特别在模具型面、叶片型面的加工中曾得到大量应用。但由于混气后使加工速度降低，同时混气设备、混气过程的控制都比较复杂，还由于零件毛坯精化、电火花加工技术、数控切削技术的发展和完善，全面的技术经济比较，使得混气电解加工的应用逐渐减少，但仍然在某些领域发挥其独特的作用。

3　电解加工的流场设计

在电解加工中，流场直接关系到电解加工精度的高低、表面质量的好坏，甚至决定到电解加工的成败。合理的流场设计是电解加工得以成功的基础。

流场设计包括电解液流动形式的确定，电解液进出口压力、速度的分布、计算，流场的均匀性设计等。

3.1　电解液流动形式

3.1.1　流动形式的分类及特点

流动形式，是指电解液流向加工间隙、流经及流出加工间隙的流通路径、流动方向的几何结构。

电解液流动形式传统上分为两类：侧向流动和径向流动，径向流动又分为正流式和反流式两种（图 4.2-10，图 4.2-11，图 4.2-12，图 4.2-13）。

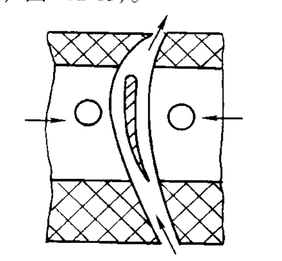


图 4.2-10　侧流式叶片双面加工

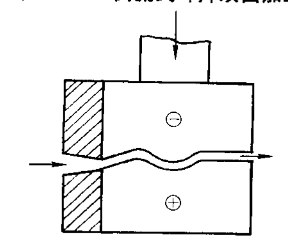


图 4.2-11　侧流式锻模型面加工

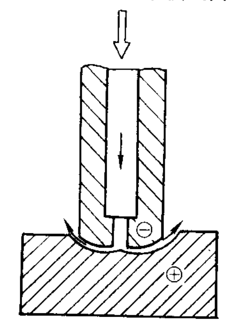


图 4.2-12　正流式加工

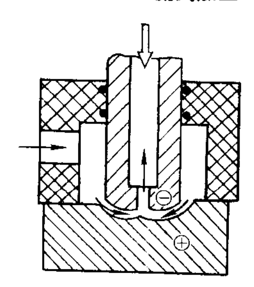


图 4.2-13　反流式加工

侧流式加工中间隙的流道横截面积沿流动方向大致保持不变；而正流式流道横截面积沿流动方向呈扩张状态，或者说电解液流动为扩散流；反流式则相反，流道横截面积沿流动方向呈收敛状，具有收敛流动特点。一般说来，收敛流动更有利于提高电解加工的稳定性和加工精度。

对几种流动形式考察可以发现，不同流动形式对于电解加工夹具和阴极的设计制造、对于加工间隙中流场的均匀性都有很大影响。其主要特点以及对电解加工的影响见表 4.2-14。



表 4.2-14　电解液流动方式比较

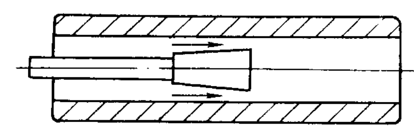
项目　结论　流动形式	侧流	正流	反流	备注
流动特点	在圆滑、缓变的通道中流动，速度、压力缓慢变化	进、出口流道有较大的转折，速度、压力变化较大		1）钛合金加工对流场反应敏感，为使流场均匀，最好在出口处施加一定的背压 2）适当设计通液口（槽），可将正流、反流方式应用于型面加工
		扩散流	收敛流	
流场均匀性	较好	较差	好	
防止空穴现象	好	较差	好	
夹具设计制造	复杂	简单	复杂	
加工型面时的阴极设计制造	简单	较复杂	复杂	
对加工形状的适应性	差	中等	好	
加工稳定性	差	较差	好	
加工精度	中等	较差	好	
流场分布的可控制性	差	较好	好	

除了上面介绍的两类流场外，有学者又提出了其他三类（包括若干型）流场：轴向供液类、喷射供液类和组合供液类。仔细分析，其实也脱胎于上述两种基本类型，或者兼具二者特点。

（1）轴向供液类

轴向供液中，工作液从加工间隙的一方流向另一方，类似侧向流动，但工作液环绕整个阴极外表面向前流动，又与径向流动类似，不过，轴向供液中电解液不从阴极底面中心流入或流出。具体可以分为 5 种。

1）单向供液法　电解液从工件的一端流向另一端，如图 4.2-14 所示，一般用于移动式锥体阴极加工深孔。电解液从阴极小头流向大头为正流法，从大头流向小头为反流法。正流法加工中，电解产物从大间隙处流向小间隙处的精加工区，会影响加工质量和过程的稳定性；反流法加工中，小间隙处的精加工区电解液较纯净，但属于扩散流动，加工表面易出现流纹。



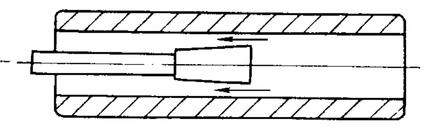


图 4.2-14　轴向正流法

2）分段供液法　将较长的阴极工作部分中间以密封环隔开，前后分两段各自分别供液，如图 4.2-15 所示。该方法可缩短流程、提高流速，但结构复杂，制造比较麻烦，且中间密封环容易损坏。

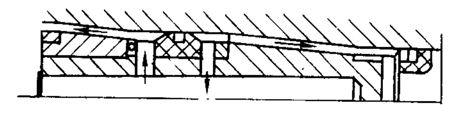


图 4.2-15　分段供液法

3）双向供液法　双向供液中，电解液从阴极中间流出，分别向前后两锥同时供液，如图 4.2-16 所示。

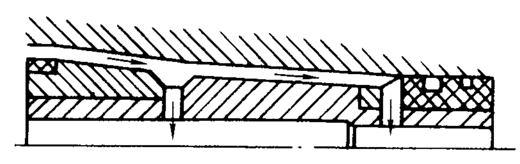


图 4.2-16　双向供液法

该法正、反两向同时供液，使得前后锥流程显著缩短、流量成倍增加，产物排出迅速，散热条件改善，利于提高加工效率和精度，节能省电，制造容易，使用安全，目前已在深孔电解加工中获得广泛应用。

上面三种供液法适用于移动式阴极。以下两种方法本质与上面一致，主要用于固定式阴极加工中。

4）定向供液法　在固定式阴极电解深孔（扩孔）或抛光中，阴极和工件间没有相对运动，阴极长于工件，工作液从工件一端流向另一端，如图 4.2-17 所示。在工件较长的情况下，加工区两端电解液压力、温度等参数相差较大，对加工尺寸一致性及表面质量有影响。

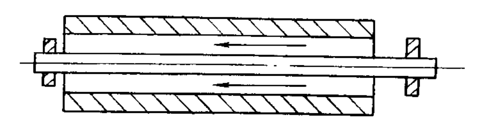


图 4.2-17　定向供液法

5）换向供液法　为减轻定向供液中电解液参数变化对加工的影响，通过定时改变供液方向，使得固定阴极加工时电解液压力、温度、浓度等参数对工件两端的影响趋于一致，图 4.2-18 为换向供液法。

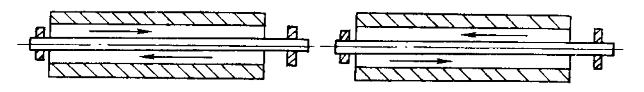


图 4.2-18　换向供液法

（2）喷射供液类

喷射供液常用于展成电解加工中，即阴极以运动轨迹的包络面形成工件表面，或者用于回转体工件加工中。

1）外部供液类　工作液沿加工面的切向喷入间隙，有点类似侧向供液，但流道短，无需专用夹具，图4.2-19为外部供液类。

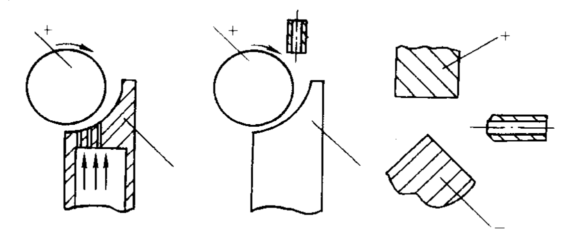


图4.2-19　外部供液类

2）内部喷射法　展成电解切入式加工、平面电解铣削加工、回转体内台阶孔电解加工中均采用此方式供液，图4.2-20为内部供液类。

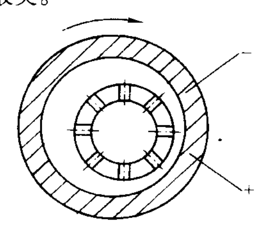


图4.2-20　内部供液类

（3）组合供液类

在复杂型腔加工或某些特殊要求加工中，常采用组合供液方式以改善流场。如复杂型腔加工以侧向供液为主，在角度较大的过渡部位再开设一定数量的径向供液孔或狭缝，以改善局部的流动状态（图4.2-21）。对底部要求平整的盲孔加工，常在阴极端面开设大量均匀密布的小孔（图4.2-22）。有时采用圆孔与窄槽组合供液；有时采用直槽与曲槽组合供液（图4.2-23）；有时还采用进液和排液槽相结合的形式（图4.2-23）。图4.2-24为多头组合加工，对阴极每个头部都采用了从内外两个方向同时向加工区供液的方法。

1）侧、径向组合供液法；

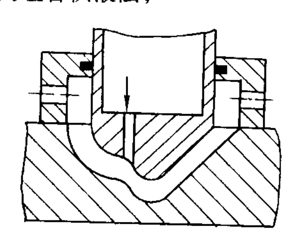


图4.2-21　侧、径向组合供液类

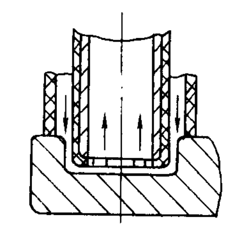


图4.2-22　多孔组合供液类

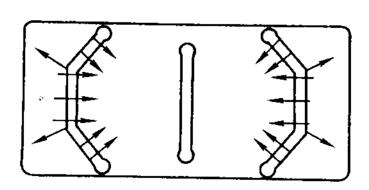


图4.2-23　多槽组合供液类

2）径向多流组合供液法；

3）双向多头组合供液法。

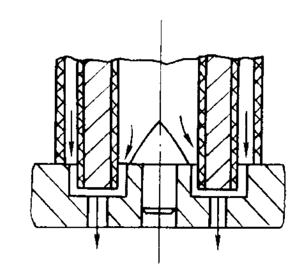


图4.2-24　双向多头组合供液类

3.1.2　确定流动形式的一般原则

（1）根据加工对象的几何形状确定

对于型面曲率变化不大的三维型面，如一般叶片型面、叶片锻模型腔等，可以采用侧流式。

对于圆孔、型孔类可采用正流式和反流式。

对于深孔扩孔加工可以采用轴向供液。在孔的固定式抛光中也采用轴向供液法。

切入式展成电解加工采用工作液由阴极内部喷出式喷射供液，外表面光整展成加工采用外部切向喷射式供液。

对于某些复杂型腔或型面，可在阴极上设计适当的通液槽（孔），采用正流式或反流式，或者两种流动形式都存在的复合流动形式加工。但对应通液槽（孔）口的加工面上会残留凸起，给后续型面光整加工带来一些麻烦。

（2）根据加工精度要求确定

一般地，形状复杂且精度要求高的工件可选用反流式或复合流动形式，但其夹具或阴极的设计制造比较困难。

3.2　电解液流速和进口压力

电解加工中，电解液流动要足以排出间隙中的电解产物与所放出的热量，必须有一定的流速。为了更好地去除阴极、阳极表面的电解产物，减小电极附近的浓差极化并使液流均匀，电解液的流动必须呈紊流状态，也要求电解液有一定的流速，进口压力则是保证电解液流速的必要条件。某些材料电解加工，其加工精度、表面质量对电解液流速的影响特别敏感，更要注意流速的选取，一般要选取更高一些的流速，相应电解液的输送压力也应该更高。下面对间隙进口电解液流速和进口压力的确定原则分别加以分析。

（1）电解液流速的确定

1）去除电解产物和气泡所需流速　电解产物和气泡会影响加工间隙内电解液的电导率，会产生极化现象，进而影响加工电流；由于电解产物和气泡的不规律分布还会造成加工电流的波动，影响加工质量。实验表明，只有当电解液流动达到一定的界限流速时，电流才能保持较为稳定的状态。

2）实现紊流所需流速　确定流态的判别准则为雷诺系数

$$Re=\frac{uD_h}{\nu} \tag{4.2-9}$$

当 $Re<2\,300$ 为层流，$Re>2\,300$ 为紊流。

故对应紊流状态的流速 u_T 应该满足下式，即

$$u_T>2\,300\frac{\nu}{D_h} \tag{4.2-10}$$

式中，ν 为电解液的运动黏度系数，可近似用水的黏度系数代替。有关数值参见表4.2-15；D_h 为水力直径，其计算可参照表4.2-16进行。

表 4.2-15　水的运动黏度系数 ν

温度 t/℃	0	10	20	30	40	50
$\nu/\mathrm{m^2 \cdot s^{-1}}$	1.79×10^{-6}	1.31×10^{-6}	1.01×10^{-6}	0.80×10^{-6}	0.66×10^{-6}	0.56×10^{-6}

表 4.2-16　水力直径 D_h 的计算公式

（据 $D_h=\frac{4A}{L}$ 导出，A 为过水面积，L 为过水截面的湿边周长）

过水截面	D_h	$(a^2-b^2)/a^2$	K
圆形（直径 D）	D	0.1	0.025 5
		0.2	0.052 0
环形（外径 D，内径 d）	$D-d$	0.3	0.079 8
		0.4	0.109 0
正方形（边长 a）	a	0.5	0.139 8
		0.6	0.172 5
矩形（边长 a、b）	$\frac{2ab}{a+b}$	0.7	0.207 2
		0.8	0.244 4
椭圆（长轴 $2a$，短轴 $2b$）	$\frac{2b}{1-K}$ K 的选择见右栏所列	0.9	0.284 2
		0.99	0.322 7

3）控制温升所需流速　大量的生产实践表明，一般控制液槽中电解液温度不超过 45℃，至多也不能超过 50℃，通常以 35℃为宜。

据式（4.2-11）可知，电解液经间隙中流程 L 以后，温升为

$$\Delta T_e = T_e - T_0 = \frac{U_R i}{\rho_1 u_0 \Delta_0 C_1} L = \frac{i^2}{\rho_1 u_0 \kappa_0 C_1} L \tag{4.2-11}$$

可得到对应温升 ΔT_e 的进口流速为

$$u_0 = \frac{U_R i}{\rho_1 \Delta_0 C_1 \Delta T_e} = \frac{i^2}{\rho_1 \kappa_0 C_1 \Delta T_e} L \tag{4.2-12}$$

由式（4.2-12）可知，间隙进口电解液流速 u_0 随电流密度 i 的增加按平方指数增加，即电流密度 i 增加，阳极溶解速度加快，电解产物增加，同时温升也加快，故要求电解液流速增加。此外，确定电解液进口流速 u_0 还与流程长度 L、允许温升 ΔT_e 以及电解液的性质，即密度 ρ_1、电导率 κ_0、比热容 C_1 等参数有关。允许温升 ΔT_e 越小，所需电解液流速就更高。

一般而言，在上述两项要求中，抑制温升所需的流速比保证紊流状态所需的流速更高，故确定流速的基本步骤是先从控制温升出发，即先根据式（4.2-11）确定流速值，然后再根据式（4.2-10）验算是否保证紊流状态，如不能达到紊流状态，则需从式（4.2-10）出发调整流速。

流速确定后，可决定流经加工间隙的电解液流量 $Q_{隙}$

$$Q_{隙} = u_0 A_0 \tag{4.2-13}$$

式中，A_0 为间隙进口处流道的横截面积，对侧流式：$A_0 = B\Delta_0$，对径向流动：$A_0 = 2\pi r_0 \Delta_0$。这里，Δ_0 为进口处间隙，r_0 为进液孔半径。

考虑到各种复杂工艺因素，实际需要电解液泵输送的电解液流量 $Q_{泵}$ 比上面计算的需要流过加工间隙的流量 $Q_{隙}$ 大得多。具体估算可按式（4.2-14）进行：

$$Q_{泵} = K_1 K_2 F Q_{隙} \tag{4.2-14}$$

式（4.2-14）中，K_1 为考虑溢流所需的流量调整系数，通常取 K_1 稍大于 1，即 $K_1 = 1.1 \sim 1.2$；K_2 为考虑泄漏的系数，对侧流式 $K_2 > 1$，对径向正流和径向反流，$K_2 = 1$；F 为考虑加工型面复杂程度的系数，简单形状取 $F = 1$，复杂形状则 $F > 1$，形状越复杂，加工面积越大，则 F 取值越大，例如，对低压混气电解加工三维型腔，通常取 $F = 1.5 \sim 4$。对叶片双面进给加工，通常取 $K_2 F = 5 \sim 7$；形状越简单，叶片面积越小，夹具密封好的取下限值；反之则取上限值。

根据上述抑制温升及保证紊流状态的原则确定了流速，在夹具设计中还必须注意在间隙进口前安排适当长度的导流段（图 4.2-12），以确保从加工间隙进口开始的间隙全长上均处于紊流，由于阴、阳极及夹具壁面对电解液的黏滞作用，间隙中的流态分布由进口段的层流经过一定流程后逐渐发展到紊流状态（图 4.2-25），所以设置进口前的导流段很有必要，对混气电解加工更需特别注意。

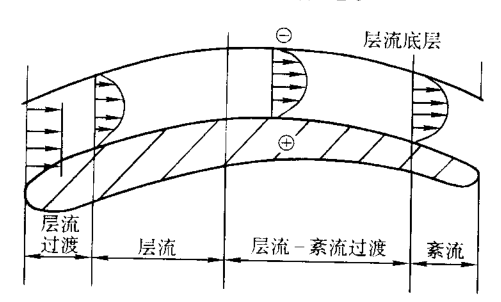


图 4.2-25　间隙通道中的流态发展过程

（2）电解液压力的确定

电解液压力是指加工间隙进口处的压力 P_0（简称进口压力）和电解液输送泵的出口压力，考虑到管道中的压力损失，一般电解液泵出口压力需比间隙进口电解液压力高 0.05～0.1 MPa。确定电解液进口压力的方法如下。

由于间隙进口前电解液管道的横截面积远大于加工间隙的横截面积，所以电解液在输送管中的流速远远小于间隙中的流速，或者可近似假设在管道中的流速为零（更准确地说，相对于电解液在间隙中的流速，近似认为管道中流速为零）。在这样的假设前提下，可以认为电解液进口压力具有三个作用：提供电解液在间隙中流动的速度能（又称动压），克服间隙中的黏性摩擦阻力，以及平衡加工间隙出口端的压力（背压）。基于流体动力分析，电解液进口压力的计算可参照表 4.2-17 所列各项进行。若以电解液密度 $\rho_1 = 1.1\times10^3\ \mathrm{kg/m^3}$ 为



例，对于不同加工类型，一定流速下有关各项压力的范围（大致计算结果）列于表 4.2-18，其数值范围与前述根据统计所得出的压力范围（表 4.2-5）基本一致，可供实际选用参考。

表 4.2-17　电解液压力计算

	侧流式	正流式	反流式
流动形式	（示意图：P_0、u、P_e）	（示意图：P_0、P_e、u_e、r_0、R_0）	（示意图：P_e、u_e、P_0、r_0、R_0）
动压 P_u	$P_u=\frac{\rho u^2}{2}$	$P_u=\frac{\rho u_e^2}{2}$	
黏性摩擦 P_γ	$P_\gamma=\lambda\frac{L}{D_h}\times\frac{\rho u^2}{2}$ $\lambda=\begin{cases}\frac{64}{Re} & 当\ Re<2300\\ \frac{0.3164}{Re^{0.25}} & 当\ 2300<Re<10^5\end{cases}$	$P_\gamma=\frac{12\rho\nu R_0u_e}{\Delta^2}\times\ln\frac{R_0}{r_0}$ 或 $P_\gamma=\frac{6\rho\nu Q_{隙}}{\pi\Delta^3}\ln\frac{R_0}{r_0}$	$P_\gamma=\frac{12\rho\nu R_0u_e}{\Delta^2}\times\ln\frac{R_0}{r_0}$
背压 P_e	P_e		
进口前压力 P_0	$P_0=P_u+P_\gamma+P_e$		

表 4.2-18　电解液压力、流速规范

工序种类	流速/m·s⁻¹	压力/0.1 MPa			
		动压 P_u	黏滞阻力 P_γ	出口背压 P_e	进口压力 P_0
叶片型面	15～20	1.26～2.24	3.2～5.1	0～0.51	4.36～7.85
小孔、型腔叶型套料	6～10	0.2～0.56	10.2～15.3	1.02～1.53	11.42～17.34

注：此处 $\rho_1=1.1\times10^3\ kg/m^3$，$\rho_1$ 若不同，则参考表 4.2-17，相应压力值按 ρ_1 的变化按比例修正。

由表 4.2-17 可知，当加工间隙的几何结构确定之后，流速与压力有着一一对应的关系，且流速越大，压力越高。因此，电解加工的实际过程，经常以一定的压力规范来保证间隙中的流量和流速。

还应当指出，表 4.2-17 所列计算式是针对纯液相电解液的。如果考虑气、液两相流动特性，即考虑到由于气体的膨胀而使间隙中压力增加，则气泡越大，压力增加越多，一般需按纯液相计算的值增加 10%～15%。

当加工间隙小于 0.2 mm 时，由于电极表面附面层以及介质流动毛细现象的影响，间隙中随流程增加的压力降已相当厉害；当间隙小于 0.1 mm 时，压力降将更加剧烈，如图 4.2-26 所示。

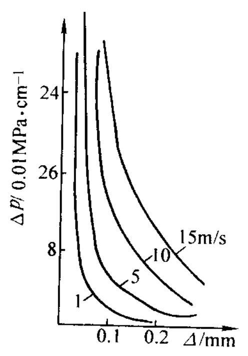


图 4.2-26　压力降与间隙、流速的关系

Δp—每厘米流程上的压力降

3.3　流场均匀性设计

流场均匀性是指加工面上各处电解液流量充足、均匀，不发生流线相交和其他流场缺陷，如空穴现象、分离现象等。

要保证流场均匀性，除了正确选择流动形式和保证一定的压力、流速外，还要合理设计通液槽（孔）。

3.3.1　通液槽（孔）的设计与流场均匀性

对于一些比较复杂的型腔、型面加工，难于采用侧流式时，必须在阴极上制作一些通槽（孔），包括进液槽（孔）和回液槽（孔），采用正流或反流方式，或者正流和反流两者都有的复合流动方式进行加工（见图 4.2-27）。

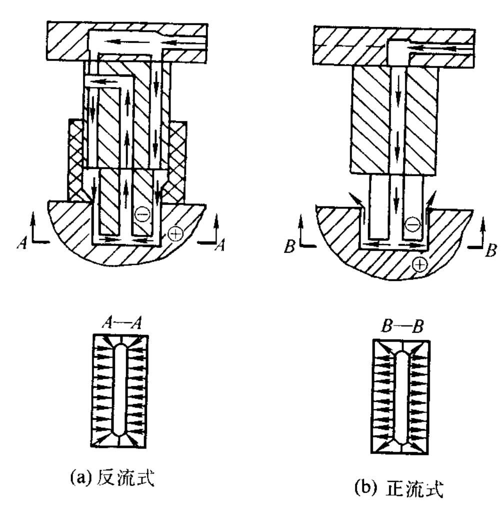


图 4.2-27　通液槽（孔）设计及流动方式举例

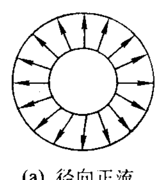
已经获得成功应用的通液槽（孔）设计方法是流线图



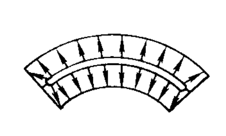
法，它以画流线图来决定通液槽的布局。

(1) 流线图

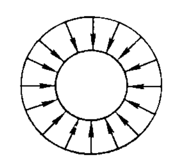
当电解加工进入平衡状态时，间隙中的流场可视为稳定流，可以画出电解液流动的流线（图 4.2-28），即流体微团的运动轨迹。



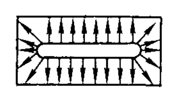
(a) 径向正流



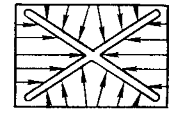
(b) 扇形正流



(c) 径向正流



(d) 矩形长条正流



(e) 矩形交叉反流

图 4.2-28　流线图实例

画流线要遵循两条基本原则：

1) 流体由进液槽流入加工区时，其流动方向与进液槽边垂直；

2) 流体由进液槽经加工区直至流到回液槽应取流阻最小路径，即流程最短。

如图 4.2-31 所示的两种进液槽设计，电解液主要部分由进液槽两侧即取与进液槽完全垂直的方向流到加工面，此处流线形状规则，称为主流线，以虚线表示。通液槽设计主要考虑主流线的分布，但次流线的分布有时对加工也会产生较大影响，对此也要注意。

(2) 流线分布对加工的影响

分析加工区域的流线分布可以研究加工区域的流场均匀性。例如流线稀疏反映相应局部缺少电解液；流线相交处则反映该局部电解液流动混乱，甚至会出现漩涡。对这样两种情况，设计流场应特别注意避免。

图 4.2-29 左侧三图表示了 3 种不合理的流场设计方案，会分别产生贫液区或流线相交等弊病（对应图中用符号 + 表示），而右侧三图则为对应提出的正确设计方案。当出现贫液区时，对应的局部电解液流速很低，不易带走电解产物和热量，使加工速度降低甚至发生短路。当发生流线相交时，对应处电解液流动混乱或局部加速，还可能形成涡流使加工速度高低不均，相应加工面产生流痕、沟槽，甚至发生短路。

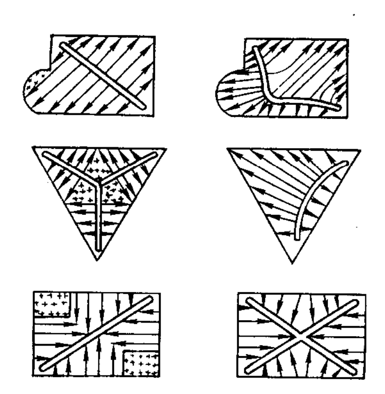


图 4.2-29　流线分布对加工的影响

以上分析了端面间隙内流线分布对加工的影响，为实际电解加工过程所证实。同样，侧面间隙内的流线分布对加工过程也有影响，在流场设计时也不能忽视。

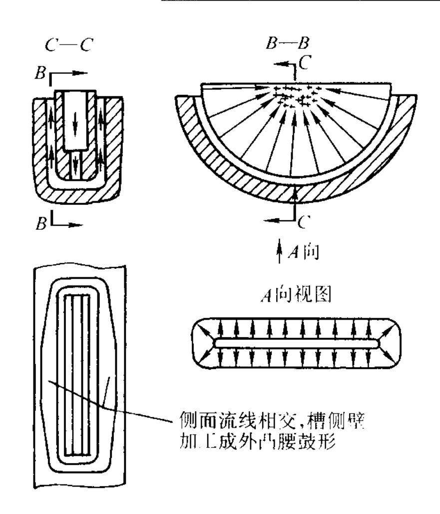


图 4.2-30　侧面主流线相交及改进措施

图 4.2-30 所示侧面中部主流线相交（用符号 + 表示），工件对应部分去除速度加快使槽壁形成外凸腰鼓形；图 4.2-31 的情况则相反，侧面中部流线分散，导致工件槽壁形成内凹。为了避免上述缺陷，可以适当加大尖边的圆滑过渡，即加大图中 $C-C$ 剖面的圆角半径 R；还可以如图 4.2-24 所示那样设计增液孔；实践证明，采用适当的背压对改善流场均匀性也是一个通用的简易办法。

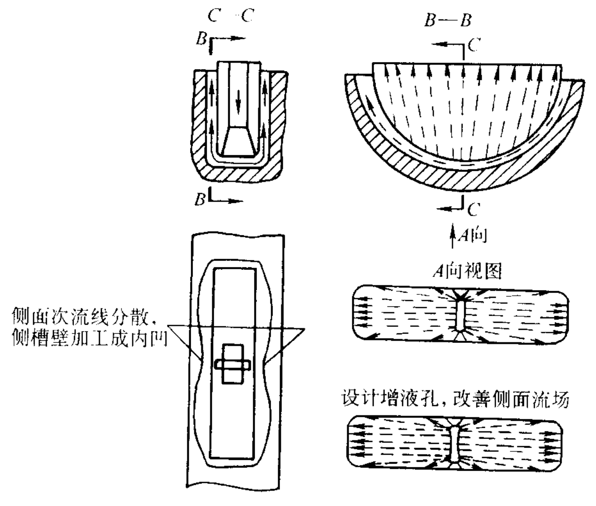


图 4.2-31　侧面次流线分散及改进措施

(3) 通液槽（孔）的设计步骤

1) 通液槽（孔）布局　通液槽（孔）的布局直接影响电解液的流线分布，设计原则是保证流线能均匀地分布在整个加工面上，且应避免流线相交，不出现贫液区；力争流程均匀并尽可能缩短流程。

对于某些比较复杂的型腔、型面加工，仅仅安置出液槽（孔）可能还满足不了上述要求。对此，可以或增开回液槽（孔），或安排适当的圆滑过渡，或采用背压技术，则诸如流线相交、贫液、流程悬殊等问题才可得到完全解决。图 4.2-32 是十字轴锻模电解加工阴极通液槽（孔）设计的几种方案比较，在中部开斜十字相交回液槽后才得到比较满意的流线分布效果。

2) 通液槽（孔）尺寸设计　通液槽（孔）的主要尺寸包括长度 L、宽度 b、高度 h（图 4.2-33），设计依据如下。

① 长度 L：当通液槽（孔）的布局面确定以后，L 即确定。

② 宽度 b：要保证输出到加工区的流道总截面积大于加工间隙的流道截面积，故宽度 b 有一个下限临界值。但 b



不能过大，过大则会在工件上留下太高的残余凸起。

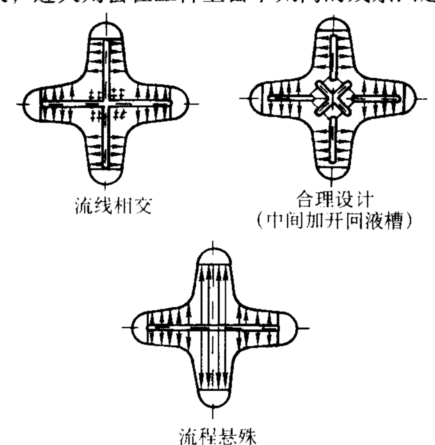


图 4.2-32　十字轴锻模阴极通液槽设计方案比较

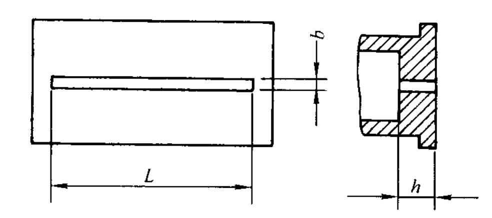


图 4.2-33　通液槽的主要尺寸

对于单个出液槽，流通截面积为 $L \times b$，对应加工间隙的流通截面积为 $2(L+b) \times \Delta$。应满足

$$L \times b \geqslant 2(L+b) \times \Delta$$

$$b \geqslant 2\Delta(L+b)/L$$

如果 $L \gg b$，则近似取 $(L+b)/L=1$，则有

$$b \geqslant 2\Delta$$

③ 高度 h：按流体管嘴原则考虑，可取

$$h=\begin{cases}(3\sim5)b\\(3\sim5)d\end{cases}$$

式中，b 为出液槽宽；d 为出液孔直径。

一般阴极上所开出的通液槽结构尺寸数据推荐为：$b=1.5\sim2$ mm；$h=10\sim20$ mm，其中纯电解液加工取下限，L 依据出液槽的布局而定。

在制造工艺方面，要求通液槽周边平直，尖边倒圆磨光，槽（孔）壁面光滑。

3.3.2　防止电解液在间隙中产生分离现象和空穴现象

（1）分离现象

当流场设计不合理或毛坯加工余量差异很大（图 4.2-34c）时，可能出现如图 4.2-34 所示的涡流区或死水区，形成原因是附面层产生分离，将严重影响加工质量，甚至出现短路烧伤。防止分离现象的措施包括精心设计电解液通道，使流道圆滑过渡，合理安置通液槽（孔）及电解液流经间隙的前、后导流段。图 4.2-34 中 a、b、d 均为设计不合理的例子，图 4.2-10 所示的进口导流段和出口导流段的设计均较合理。

（2）空穴现象

液体中产生气泡并集聚而形成气穴，使得原来连续的液相变得局部区域不连续，称为空穴现象。电解加工间隙中形成空穴的原因有：

1）高压下电解液融入气体，至低压区，气体又自液体中析出。

2）在流动过程中，由于间隙处流道的突然缩小，使该处电解液流速突增而压力突降，有可能压力降到低于该处流场条件下的汽化压力，则电解液汽化，形成气泡并集聚而形成空穴。

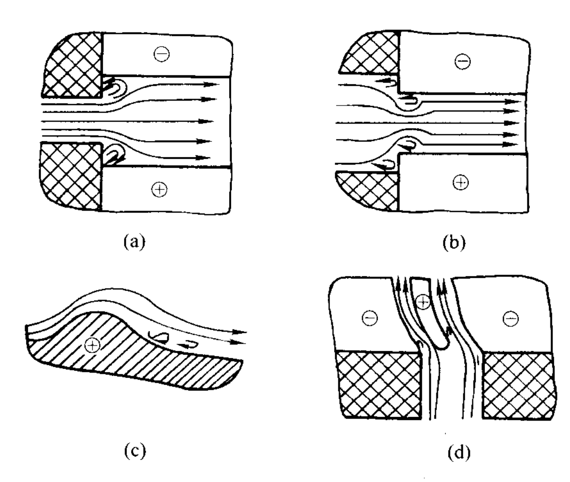


图 4.2-34　液流分离现象举例

3）加工区局部供液不足，造成该处温度过高，引起电解液沸腾、汽化而形成空穴。

一般而言，间隙中电解液产生空穴现象的主要原因是第2种。例如正流加工时，阴极出液孔附近经常会产生空穴现象，正是由于在出水孔附近间隙内压力突降所引起。产生空穴现象的对应工件表面会产生放射性条纹（图 4.2-35），这是由于空穴处电解去除量少而形成的。

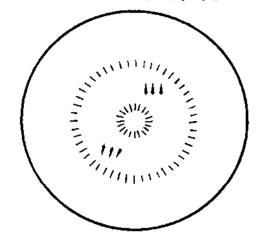


图 4.2-35　由于空穴现象而在工件表面产生放射性条纹

防止空穴现象产生的主要办法可以施加适当的背压，以防止压力突变；流道设计还应注意尽量安排圆滑过渡，避免流道突变；采用混气电解工艺更有利于防止空穴现象产生，因为混入气体的膨胀效应和搅拌作用，可以减轻或完全消除分离现象和空穴现象，使流场分布更趋均匀。脉冲电流电解加工，特别是采用高频窄脉冲电流亦有利于防止分离和产生空穴。

理论分析表明，只是在一定的加工间隙内容易产生空穴，大于或小于这一间隙范围均不易产生空穴。当间隙值小于 0.1 mm 时，由于黏性摩擦显著，有利于防止空穴产生。

3.4　混气电解加工气液混合器及其设计

气液混合器是混气电解加工系统所特有的必要工艺装备，其作用是将气体与电解液按一定比例均匀混合并输入加工区，加剧电解液扰动，以确保实现混气电解加工。混合器只有合理设计、制造及布局，才能达到保持气液混合比均匀、加工过程稳定、整平效果好、复制精度高的目的。除了保证气液均匀混合这一基本要求外，还应力求结构轻巧，制造方便，压力损失小。

3.4.1　气液混合器结构形式

根据气液混合过程的流体动力特点，或形成气液两相均匀混合介质的流体运动特征，可以将混气电解加工中已经采用的气液混合器分成引射式和强制式两大结构类型。

（1）引射式气液混合器

图 4.2-36a 所示为“液引气”式混合腔结构示意图。电解液作为主流在管 1 内流动，经截面收缩的喉部 2 时流速增大，压力降低，在压差作用下气体自管 3 引入并与电解液混



合，然后流入加工间隙。由于主流是电解液，故这一结构用于气液混合比相对较低的场合。要求气液混合比相对较高时，可采用“气引液”的结构（图4.2-36b）。

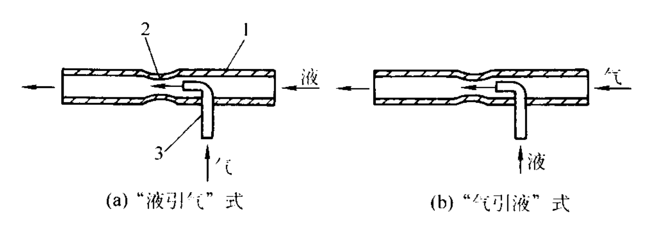


图4.2-36 引射式气液混合器

引射式气液混合器结构简单，容易制造，常应用于截面形状规则，接近于圆形、方形的型腔、型孔加工。对于形状复杂且加工面积较大的场合，常采用强制式混合器。

（2）强制式气液混合器

这类混合器的流体动力特点是电解液与气体分别在一定压力下被强制以不同方向（经常是以相互垂直方向）流入混合腔，在混合腔内实现气液两相均匀混合，然后再流入加工间隙实现混气电解加工。

图4.2-37为圆形强制式混合器结构。电解液由中心管道流入，经圆锥面上分布的多排小孔喷射进入混合腔；气体由两侧气管流入环形腔，再经由多排小孔喷入混合腔；喷液小孔与喷气小孔一一对应，故喷入混合腔的气、液也一束束对应混合；喷液孔设计成切向喷出，可以带动气体一起在混合腔室中螺旋流动而增加混合时间，从而使气液混合更加均匀。

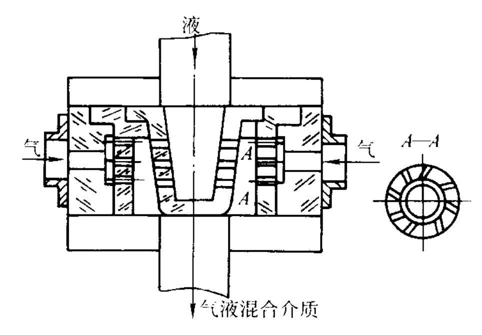


图4.2-37 圆形强制式混合器整体结构

实际电解加工的进口间隙截面往往为扁长窄缝，如叶片双面进给电解加工就是如此（见图4.2-10），由图4.2-37所示的混合器气液混合腔的圆形出口过渡到扁长窄缝（间隙进口的形状）比较困难，为此又设计出图4.2-38所示的长形强制式混合器。为了增加混气量并使之混合均匀，气体可由上下两排孔喷入上下两个混合腔，使电解液在下层混入气体后到上层又二次混入气体。长形混合器的出口很容易向扁长形间隙进口过渡，为整个电解液流道设计、制造带来方便，且气液两相混合物流向加工区更加平稳，不会产生由于截面急剧变化而引起气液分离及流动阻力突增等弊病。

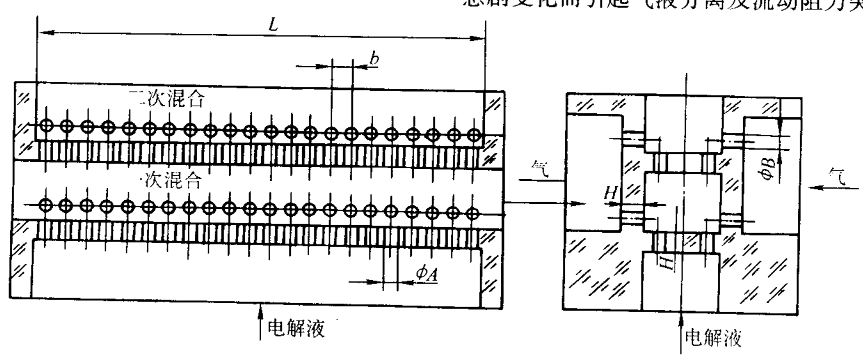


图4.2-38 长形强制式气液混合器（二次混气）

上述两种强制式混合器在生产中都有应用，圆形的除用于孔类、型腔类加工外，小型叶片加工中也常应用；长形的则用于较长的叶片电解加工中。更为复杂的零件加工，应该根据零件形状和加工要求，参照上述结构设计的一般原则进行具体设计。

3.4.2 气液混合腔几何尺寸设计

混合腔是气液混合器中的关键零（部）件，其几何尺寸直接影响到气液混合器混合效果。以图4.2-38所示混合腔为例，主要几何参数包括通液孔直径 ϕA、通气孔直径 ϕB、通液（气）孔数目、分布（孔间中心距 b）以及气液混合腔室的体积，它们影响到气液混合的均匀性及混合过程的稳定性。长形混合腔主要几何尺寸的一般设计原则如下。

1）为了保证加工区内有充足的电解液，并考虑到由混合器流入加工区中间过程的泄漏，通常取通液孔总面积为间隙进口截面积的5～20倍；夹具结构复杂、泄漏较多时取上限。

2）考虑到气体体积膨胀及流动阻力比液体小，在通常采用的气液混合比 $Z=1\sim3$ 的范围内，取通气孔总面积为通液孔总面积的25%～33%。

3）考虑到混合过程的稳定性，即在输入到混合器前气、液压力接近的条件下［通常取进气压力 $P=0.4$ MPa（表压），进液压力 $P=0.5$ MPa（表压）］，确保进入混合腔的气体不会流入进液管道阻碍液流，液体也不会流入进气管道而阻碍气流。由于通常选择液压高于气压，故在气液通道上要安装逆向止回阀保证电解液不进入气路。一般取混合腔室中气液两相混合介质的压力为0.38～0.4 MPa，则相应取通液孔、通气孔直径（ϕA、ϕB）为 $\phi2\sim3$ mm，太大则可能液阻气或气阻液，太小则流阻增大。混合腔壁厚度，即通液（气）孔的长度 H 需根据总体结构设计而定，既不能太大，又要保证一定的强度和刚性，通常取3 mm左右。

通液（气）孔的直径确定后，根据总的通液面积确定通液孔数目，相应按总面积比例也可确定通气孔个数。一般通液（气）孔均匀分布，相邻孔中心距 $b=4\sim5$ mm为宜，孔径大则孔中心距取大些。

4）为了保证气液两相充分均匀混合，混合腔室的体积应保证大小适当。一般腔室的长度 L 由间隙长度或工件几何尺寸决定，通常取 L 等于或略大于间隙的长度，再取适当的宽度、高度就可决定腔室几何设计。

3.4.3 气液混合器的安装位置

为使在混合腔室中已初步混合的气液两相介质有一个更充分混合的过程，消除一束束气液分离的现象，混合腔到加工区应保持适当的距离，这一距离不能太长，否则均匀混合好的气液两相介质在进入间隙前又会分离。通常从混合腔出口到加工区进口的距离，对小型工件（流量也小些）取200～

300 mm，对大型工件，如大型叶片，取 400 ~ 600 mm。

除了上述距离应适当外，由混合腔出口到间隙进口之间流道的过渡应该缓和、圆滑、不允许突然转折或截面积突然变化，以防止气液分离。气液分离会造成压力脉动，加工过程不稳定，甚至发生短路烧伤工件、阴极，对此要特别注意。

3.5 电解加工流场设计实例

根据设计原则及加工工艺要求进行具体流场设计时，应该灵活应用设计原则并注意吸取成功的经验与失败的教训。表 4.2-19 ~ 表 4.2-24 列举了几种加工类型的流场设计实例，具有重要参考作用。

表 4.2-19 正流式加工等截面孔、槽（加工装置参见图 4.2-27）

加工工件截面形状	阴极底面出液槽与流线分布	备 注	加工工件截面形状	阴极底面出液槽与流线分布	备 注
		十字交叉式出液槽结构不合理，会造成流线相交			阴极中心开回液槽，底面开环形出液槽，也可达到加工要求
					另一种方案，工件残余凸起较大
		此方案可用于直径较小的圆孔加工，避免在底面残留较大的凸起，但流程长短不均			
		另一种方案			

表 4.2-20 反流式加工等截面型孔（加工装置参见图 4.2-28）

加工工件截面形状	阴极底面出液槽与流线分布	备 注	加工工件截面形状	阴极底面出液槽与流线分布	备 注
		此方案加工时，电解液流程不均，只适于加工横截面积不大的方孔			此方案适于 x 不大的三角孔加工

续表 4.2-20

加工工件截面形状	阴极底面回液槽布局与流线分布	备　注	加工工件截面形状	阴极底面出液槽与流线分布	备　注
		另一种方案，但回液槽结构复杂			
		另一种方案，但回液槽结构复杂			
					1 2 3 4 阴极加工部位是一块成形阴极板，安装在电解液回液套上 1—电解液；2—阴极板；3—电解液套；4—导电杆
		底面两进液槽会在两槽之间形成流线相交，使加工不稳定			

表 4.2-21　反流式加工型腔

加工工件截面形状	阴极底面出液槽与流线分布	备　注	加工工件截面形状	阴极底面出液槽与流线分布	备　注
		另一种方案			正流式加工，同时加背压，同样可达到加工要求
				F—F	
	1　2　A	采用零件 A 使加工面上电解液均匀。1、2两处的侧隙设计同样为使流场均匀		F—F	

表 4.2-22　正流式加工同时附加背压的流场设计

加工工件截面形状	阴极底面出液槽与流线分布	备　注	加工工件截面形状	阴极底面出液槽与流线分布	备　注
		本方案适用于小直径的半球型腔加工			

续表 4.2-22

加工工件截面形状	阴极底面出液槽与流线分布	备注	加工工件截面形状	阴极底面出液槽与流线分布	备注
					另一种方案
		另一种方案			

表 4.2-23 电解穿孔的流场实例

加工工件截面形状	阴极底面出液槽与流线分布	备注	加工工件截面形状	阴极底面出液槽与流线分布	备注
	1 2 α	两侧电解液多、周向流动均匀。 两塑料保护块使电解液从开始加工时就均匀分布在周向 1—阴极加工刃；2—塑料保护块			工具阴极 背压套 工件 电解液 电解液进液腔 加背压使得最后光整加工时流场稳定
	α				
					导流管可防止电解液由叉口处溢出，保证上部加工正常



表 4.2-24 侧流式加工流场设计（参见图 4.2-9，图 4.2-10）

加工工件截面形状	阴极底面出液槽与流线分布	备 注	加工工件截面形状	阴极底面出液槽与流线分布	备 注
					此方案避免采用，因流程太长
					合理选择电解液流动方向，以保证流程短，且各处流场尽量均匀
		加工终止时截面图（开始加工时，间隙很不均匀）			
		加工终止时截面图（开始加工时，间隙很不均匀）			

4 电解加工精度

新材料、新结构的不断涌现给电解加工提供了更广阔的应用领域，提出了更高的工艺指标要求，特别是对加工精度的要求越来越高，而传统的直流电解加工难以满足新的要求。电解加工生产中目前能达到的加工精度见表 4.2-25。提高加工精度成为电解加工进一步发展的关键所在，是国内外研究的热点。

4.1 电解加工精度及加工误差

电解加工精度包括两个方面。

1）复制精度。对拷贝式成形电解加工，所加工工件的形状、尺寸由成形工具阴极拷贝、复制得到。所谓复制精度，是指加工所得工件与阴极之间形状及尺寸的接近程度，或者说，吻合程度。由于电解加工是有间隙、非接触式加工，而且通常间隙分布还不均匀，因此，工件被加工表面的形状、尺寸与工具阴极加工表面的形状、尺寸不可能复制得完全一致，其间存在一定的差别。这个差别，就是因为存在按一定规律分布的加工间隙所引起。加工间隙越小，分布越均匀，工件与阴极的形状、尺寸越接近、越吻合，复制精度越高。

2）重复精度，指用同样的阴极、同样的加工条件和加工参数所加工的一批工件的形状、尺寸的一致性、重复稳定性。

精度常用误差来反映，电解加工的综合误差既包括工艺自身特点所引起的误差，又包括外围条件所造成的误差。

工艺自身特点所引起的误差简称为电解加工误差，由三部分组成：①复制误差，即工件型面与阴极型面的差异；②遗传误差，即加工过程中未完全纠正的毛坯型面的初始误差；③重复误差，即在同一条件下加工尺寸的分散度。

外围条件引起的误差是指工件定位夹紧误差、阴极定位夹紧误差、阴极形状及尺寸的制造误差、机床与夹具安装定位面的形位误差、进给系统运动及定位误差等。

表 4.2-25 列出了电解成形加工常用类别的加工精度及加工效率数据。

4.2 影响电解加工精度的基本规律

4.2.1 电解加工的误差特性

电解加工阴极与工件之间存在加工间隙，间隙受电化学、电场、流场诸多复杂因素影响，是时间、空间的函数。间隙的存在及其变化，构成电解加工误差的根本来源。因此，加工误差实质上是工件加工面阳极溶解不均匀性的宏观反映，必须从阳极溶解过程的微观本质及其伴生的宏观间隙来认识电解加工误差的变化规律，并寻求提高电解加工精度的途径。



表 4.2-25　电解成形加工的精度、效率

加工类别示意图	工序对象及特征尺寸 /mm		加工精度 /mm	进给、供电方式	供液方式	允许去除速度 /mm·min^{-1}
	成形凸台		0.20～0.30	连续	反流	1.0～1.5
			0.10～0.20		正流、混气	0.50～0.80
	均匀变化复杂表面	$L<450$	0.30～0.50	连续	侧流	0.10～0.30
		$L<200$	0.15～0.30			0.20～0.50
			0.15～0.25		侧流、混气	
			0.10～0.15	脉冲—周期	侧流	0.05～0.12
	锻模型腔	型腔深≤10	0.10～0.15	脉冲—周期	侧流	0.08～0.10
		型腔深>10	0.30～0.70	连续	正流加背压	0.50～1.50
			0.15～0.25		正流、混气	0.20～0.50
			0.08～0.15	脉冲—周期	正流	0.08～0.10
	圆柱孔	$D<5$	0.10	连续、工件旋转	正流	5～10
		$D>5$	0.10～0.30	连续、工件不旋转		0.50～3
	正方或三角孔	$R=0.6\sim1$	0.30～0.80	连续	正流	0.50～1
		$R=0.5\sim0.7$	0.20～0.50		反流	1～1.50
		$R\approx0.3$	0.10～0.20		正流、混气	0.20～1.00
	直母线异型通孔	毛坯有预孔	0.05～0.10	连续	通过预孔反流	10～15①
	复杂异型通孔	毛坯有预孔	0.50～0.70	连续	正流	0.50～1
			0.50～0.60		正流加背压	
			0.30～0.40		反流	1～1.50
			0.10～0.20		正流、混气	0.20～0.50
	窄槽	$H=4\sim10$ $L=10\sim20$	0.15～0.20	连续	正流	1～1.50
		$H=2$ $L=10\sim20$				0.10～0.20
	侧壁直母线型腔	侧壁与底面圆弧转接 $R=3\sim5$	0.30～0.50	连续	正流加背压	0.80～1.0
			0.20～0.40		反流	1～1.50

① 带锥度的三面进给阴极送进速度。

图 4.2-39 表示了电解加工误差及其成因的关系。

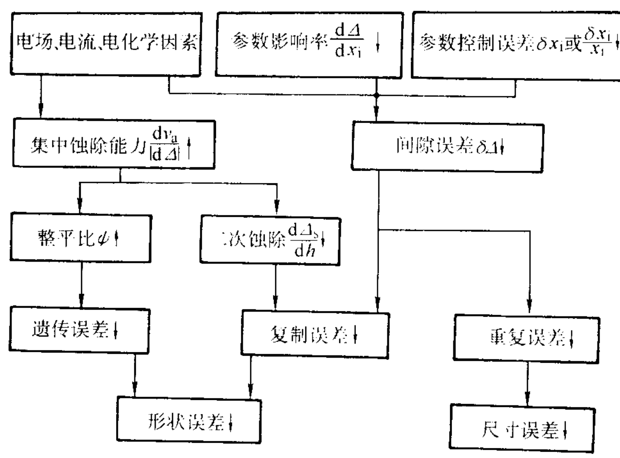


图 4.2-39 电解加工误差及其成因的关系

x_i—间隙公式中各参数的统称；

↑—向增加方向变化；↓—向减少方向变化

（1）遗传误差特性

在三维表面（如模具型腔、叶片型面等）电解加工中，复制成形没有达到平衡之前，加工间隙随时间不断变化，属于工件逐渐成形的间隙过渡过程，如图 4.2-40 所示。

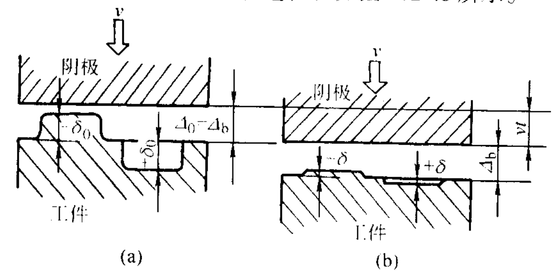


图 4.2-40 电解成形整平过程示意

(a) 加工前；(b) 加工后

在本篇第 1 章第 4 节，对恒速进给的平行平板阴极加工过程作适当简化假设，已经推导出描绘间隙从 Δ_0 向 Δ_b 过渡的相关方程式：

$$L' = (\Delta'_0 - \Delta') + \ln\left(\frac{1-\Delta'_0}{1-\Delta'}\right) \tag{4.2-15}$$

$$L = vt = (\Delta_0 - \Delta) + \Delta_b\ln\left(\frac{\Delta_b - \Delta_0}{\Delta_b - \Delta}\right) \tag{4.2-16}$$

$$h = \Delta_b\ln\left(\frac{\Delta_b - \Delta_0}{\Delta_b - \Delta}\right) = \Delta_b\ln\frac{\delta_0}{\delta} \tag{4.2-17}$$

式中，Δ_0 为初始间隙；Δ 为去除余量 h 后的间隙；Δ_b 为平衡间隙；h 为去除的余量；L 为进给深度；δ_0 为毛坯原始误差；δ 为去除 h 后存在的误差；Δ'_0、Δ'、Δ'_b、h'、L' 为相应符号的参数除以平衡间隙 Δ_b 的无因次量。

根据式（4.2-15）可以作出表示过渡过程的相应曲线，如图 4.2-41 所示。

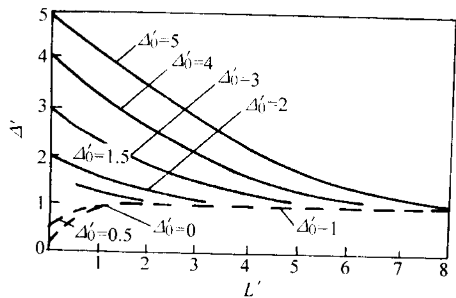


图 4.2-41 从初始间隙向平衡间隙的趋近过程

从图 4.2-41 可以分析电解加工间隙从初始间隙 Δ_0 向平衡间隙 Δ_b 变化的过渡过程。

1）图中 $\Delta' - L'$ 曲线显示，随着加工送进距离 L 的加大，也即意味着去除余量 h 的加大，加工间隙逐渐趋向平衡间隙。但在理论上，无论送进距离 L 多么长，加工间隙也只是趋近而不能达到平衡间隙，即图中 $\Delta' - L'$ 曲线只趋近 1 而不可能达到 1。但当 L 达到一定数值时，加工间隙已相当接近平衡间隙，从工程角度来看，可以认为已近似达到平衡间隙。但达到平衡间隙所需送进距离的大小又与初始间隙 Δ_0 有关：例如，对于初始间隙 $\Delta_0 = 2\Delta_b$（$\Delta' = 2$），当 $L = 3.5\Delta_b$（$L' = 3.5$）时可以认为已达到平衡间隙； 而 当 $\Delta_0 = 5\Delta_b$（$\Delta' = 5$）时，送进 $L = 8\Delta b$（$L' = 8$）才近似达到平衡间隙。综上所述，可得结论：加工送进距离越长，加工间隙越趋近平衡间隙；初始间隙越大，达到平衡间隙所需的加工送进距离越大，反之亦然。

2）当去除的余量大到能够使加工间隙近似达到平衡间隙时，一般认为工件已经成形，已经去除了毛坯余量并消除或大大减小了由于毛坯余量分布不均而引起的工件形状误差。例如，讨论图 4.2-41 中 $\Delta_0 = 5\Delta_b$（$\Delta' = 5$）的 $\Delta' - L'$ 曲线，当 $L' = 8$ 时，加工间隙已近似达到平衡间隙，则认为此时工件已经加工成形。或者说，对于需要采取 $\Delta_0 = 5\Delta_b$ 进行加工的工件毛坯，其加工距离，或者说，所需电解去除的余量，至少需要 $L = 8\Delta_b$。如果加工深度未达到 $L = 8\Delta_b$，即 $L' < 8$ 即中止加工，则毛坯最大间隙处尚未达到平衡间隙，加工面将存在由于毛坯形状误差（由毛坯余量差异所造成）所带来的遗传误差，其数值可从图 4.2-41 进行估算。首先根据具体加工条件算出平衡间隙 Δ_b，然后根据去除的余量和毛坯最大初始间隙从图中得出该处的 Δ'，算出相应的 Δ，则 $\delta\Delta = \Delta - \Delta_b$ 即是遗传误差。类似地，也可根据式（4.2-3）估算毛坯的原始型面误差 δ_0 整平到允许误差 δ_b 所需去除的余量 h。

过渡过程所反映的主要矛盾是如何以最少的余量在最短的时间达到平衡状态，从而以最快的速度消除遗传误差。从工程实用角度出发，一般均用台阶平面（图 4.2-42 所示）的整平比 ψ 来衡量成形过程的快慢，ψ 值按式（4.2-18）计算。

$$\psi = \frac{\delta_0 - \delta_b}{h} \tag{4.2-18}$$

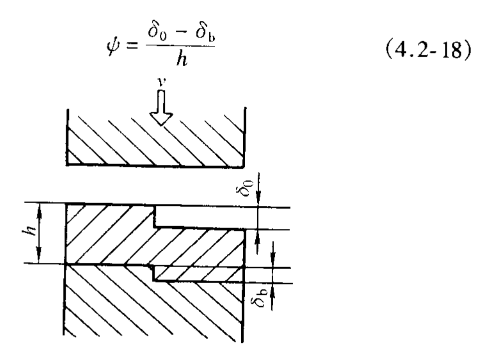


图 4.2-42 台阶面整平过程示意

整平比的物理含义是，从毛坯型面初始误差值 δ_0 减小到成品允许误差值 δ_b，误差减小值与相应的毛坯高点余量去除值 h 之比。此特征参数值因不同的 δ_0 及 δ_b 而异，是一相对度量标准，对比不同加工条件下的整平比，应选用相同的 δ_0 及 δ_b。

从阳极溶解过程特性分析，影响成形过程整平比的主要因素是阳极溶解的集中蚀除能力或称定域能力。集中蚀除能力越强，加工面最高点（余量最大处）与最低点（余量最小处）蚀除速度差值就越大，整平比就越高，遗传误差就越小。在机械加工的接触式成形过程中，材料的去除优先集中



在毛坯误差的最大处即最大余量区域，其余区域则暂不会去除，其集中蚀除能力最强，整平比为1。对于电火花加工成形过程，由于放电间隙极小，即其截止加工间隙极小，因此集中蚀除能力也很强，整平比近似于1，这些工艺基本上均无遗传误差。而电解加工特别是直流电解加工几乎不存在截止加工间隙，加工过程中整个加工区域均存在蚀除作用，区别仅仅在于余量大处间隙较小，电流密度较高，去除速度较余量小处为快，它依靠小间隙处与大间隙处腐蚀速度的差异来成形或逐渐“整平”，因此相对机械加工及电火花成形工艺，电解加工的集中蚀除能力较弱，整平比较低，会造成遗传误差。这是电解加工误差较大、精度较低的根本原因之一。

（2）复制误差特性

三维表面电解成形达到平衡状态后，工件各点沿进给方向的蚀除速度与阴极进给速度相等，此时各处加工间隙值不再变化，工件形状应该是稳定的。但由于阴极与工件之间存在间隙，二者尺寸上必然有差异，又由于间隙区电场、流场、电化学蚀除速度场分布不均匀，导致间隙分布不均匀，造成二者形状上的差异（一般可用加工区法向间隙之差表示）。这就是形成三维表面加工复制误差的原因。

对二维柱面电解衍生成形过程（如扩孔加工、叶轮套料加工等），其复制误差在横截面上是因径向间隙的存在及其不均匀分布所致，在纵截面上是因二次蚀除引起侧面间隙沿进给方向扩张存在 $d\Delta_s/dh$ 所致。前者由横截面上电场、流场、电化学参数分布不均匀引起；后者因电解加工的散蚀能力较强引起，它还会导致电解加工棱角锐度较差以及非加工面存在杂散腐蚀等问题。散蚀能力是集中蚀除能力的反面，提高集中蚀除能力也就降低了散蚀能力。

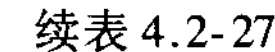
表4.2-26列举出各种类型固定阴极加工的形状误差，反映了由于间隙变化引起的误差。表4.2-27列举了用间隙分布表示的典型加工形状的复制误差类型。

表 4.2-26 各种类型固定阴极加工的形状误差

间隙形状		成形特征
初始间隙	终了间隙	
	R	仅将阴极的工作面相对置于毛坯的角部，不需仿形就可形成半径为 R 的圆角，极间间隙逐渐扩大
	R	对应整个阴极工作面，间隙逐渐均匀化并增大，被加工面上的不平度减小，尖边被倒圆为 R
		对应整个阴极工作面的间隙逐渐均匀化并增大；孔的椭圆度减小
	R	对应整个阴极工作面的间隙逐渐均匀化并增大；正方形孔壁的平行度偏差逐渐减小；四角形成半径为 R 的圆角
	R	对应整个阴极工作面的间隙逐渐均匀化并增大；孔的锥度减小；孔边缘形成半径为 R 的圆角

表 4.2-27 典型阴极进给电解加工的复制误差

加工方法特征及间隙特性	加工间隙示意图	加工部位尺寸及尺寸误差	形状误差
加工复杂型腔时，随 θ 值加大，间隙加大	Δ_b, Δ_{max}, X, H, θ	$H=X-\Delta_b$ $\delta H=\delta\Delta_b$	$\Delta_{nmax}-\Delta_{xb}$
加工内、外表面时，如阴极非工作面无绝缘，则间隙呈锥形分布	D_k, v, Δ_{xh}, D, h, Δ_{xb}, D_0	$D_0=D+2\Delta_{xb}$ $D_k=D+2\Delta_{xh}$ $\delta D_0=2\delta\Delta_{xb}$	轴向： $\Delta_{xh}-\Delta_{xb}$ 径向： $2\delta\Delta_{xb}$
	v, D_k, Δ_{xh}, Δ_h, h, Δ_{xb}, D_0, D	$D_0=D-2\Delta_{xb}$ $D_k=D-2\Delta_{xh}$ $\delta D_0=2\delta\Delta_{xb}$	轴向： $\Delta_{xh}-\Delta_{xb}$ 径向： $2\delta\Delta_{xb}$


续表 4.2-27

加工方法特征及间隙特性	加工间隙示意图	加工部位尺寸及尺寸误差	形状误差
加工内、外表面时，阴极工作面上除高度为 b 的抛光刃边外其余绝缘，间隙形状恒定，加工后侧壁相互平行，并与阴极工作面平行		$D_0 = D + 2\Delta_{xb}$ $\delta D_0 = 2\delta\Delta_{xb}$	径向：$2\delta\Delta_{xb}$
		$D_0 = D - 2\Delta_{xb}$ $\delta D_0 = 2\delta\Delta_{xb}$	径向：$2\delta\Delta_{xb}$

由于受电场、流场、电化学等多种复杂因素的影响，还没有精确而实用的复制误差计算方法，特别是三维直流活性阳极溶解过程。但是，上述分析可作为掌握定性规律的指导原则，在一定工艺条件下，应用于工程实际的近似估算可采用较为简便的 $\cos\theta$ 法。精确的间隙数值只能在具体给定的加工条件下通过试验法实测得到。二维衍生法电解加工复制误差的估算可参考式（4.2-4）和式（4.2-5）。

（3）重复误差特性

电解加工的重复误差就是平衡间隙值的分散度。由于目前还无法直接采样来实测和控制加工间隙值，只能通过控制有关的宏观工艺参数来间接控制间隙，因此工艺参数的分散度就直接影响间隙的分散度，从而影响加工尺寸的分散度。

综上所述，复制误差及重复误差的根源均出自加工间隙的存在，而间隙变化来源于间隙电场、流场及电化学参数的变化及其分布的不均匀性，由于电解加工间隙随时间、空间的变化而影响电解加工精度。

4.2.2 电解加工工艺参数对加工精度的影响

通过对电解加工误差的全面分析，得出了影响加工精度的核心工艺参数是加工间隙的结论。从平衡间隙公式的全微分式（4.2-19）中可以看出，影响间隙误差的参量首要的是平衡间隙自身的大小，然后是加工电压、电解液电导率、阴极进给速度以及电流效率。

$$d\Delta_b = \Delta_b\left(\frac{d\eta}{\eta} + \frac{dU_R}{U_R} + \frac{d\kappa}{\kappa} - \frac{d\nu}{\nu}\right) \qquad (4.2\text{-}19)$$

式中，U_R 为极间欧姆压降，$U_R = U - \delta E$。

在线性特性的阳极溶解中（使用 NaCl 电解液直流电解加工镍、铬、钴等高温耐热合金及钛合金均属此类型），如在第 1 章所论，将 $\eta\omega(U-\delta E)\kappa$ 近似为常数 C，则间隙公式简化成 $\nu_a = C/\Delta$。图 4.2-43 为不同 C 值的 $v_a - \Delta$ 理论计算的曲线族，从中可以形象地看出加工参数变化对间隙、进而对加工精度的影响。图 4.2-44 为试验所得的相应曲线族，其变化规律与理论曲线族很相近，说明可将理论曲线族作为分析工艺参数对加工精度影响规律的依据。

（1）加工间隙

图 4.2-43 曲线族的微分方程可改写成

$$\frac{d\nu_a}{d\Delta} = -\frac{C}{\Delta^2} \qquad (4.2\text{-}20)$$

从法向间隙公式还可推导出

$$\delta\Delta_n = \Delta_b\left(\frac{\sin\theta}{\cos^2\theta}\right)\delta\theta \qquad (4.2\text{-}21)$$

式中，$\delta\Delta_n$ 为加工表面上某点法向间隙的偏差值，mm；θ 为加工表面上某点的倾角（型面上该点法向与阴极进给方向夹角）。

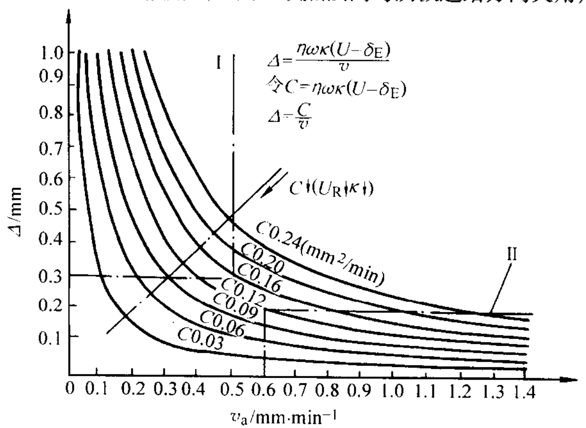


图 4.2-43 加工间隙与蚀除速度关系的理论曲线族

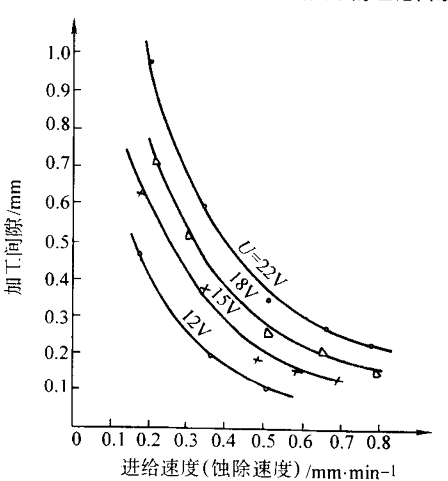


图 4.2-44 钛合金电解加工的 Δ-v 曲线族

试件：TC9；电解液：5% $NaClO_3$ + 3% NaCl；$T = 20℃$；$P = 0.6$ MPa

从间隙公式的演变式可以得出间隙对加工精度的影响规律如下。

1）式（4.2-20）表示，随间隙 Δ 减小，$|d\nu_a/d\Delta|$ 以近似二次方的变化率剧增，反映小间隙加工时集中蚀除能力显著增强，整平比增大。表 4.2-28 的试验结果也证实了此规律。



表 4.2-28　不同间隙、加工速度下的整平比

序号	试验件	电解液	加工间隙 /mm	加工速度 $/mm \cdot min^{-1}$	整平比
1	TC9 平面试件，60 mm × 60 mm，上加工 2 mm 深槽	5% $NaClO_3$ + 3% NaCl	0.35	0.30	0.53
2			0.20	0.45	0.65

2）式（4.2-21）表明，随平衡间隙 Δ_b 缩小，由 θ 的误差导致 $\delta\Delta_n$ 相应减小，因而复制误差也减小。整平比增加，复制误差减小，提高了成形精度。

3）式（4.2-19）表明，在给定的参数变化率 $\delta X_i/X_i$ 条件下，随平衡间隙 Δ_b 缩小，间隙变化值 $\delta\Delta_b$ 减小，导致尺寸分散度减小，重复精度提高。图 4.2-45 的试验结果验证了此规律。

（2）进给速度

1）在给定电解液和加工电压的条件下，由于提高进给速度而使加工间隙减小，同样显示出集中蚀除能力加强，整平比增加的效果。

2）式（4.2-19）显示，随进给速度增加，同样的速度变化引起的间隙变化值减小，导致尺寸分散度减小，重复精度提高。图 4.2-46 的试验结果证实了此规律。

（3）加工电压

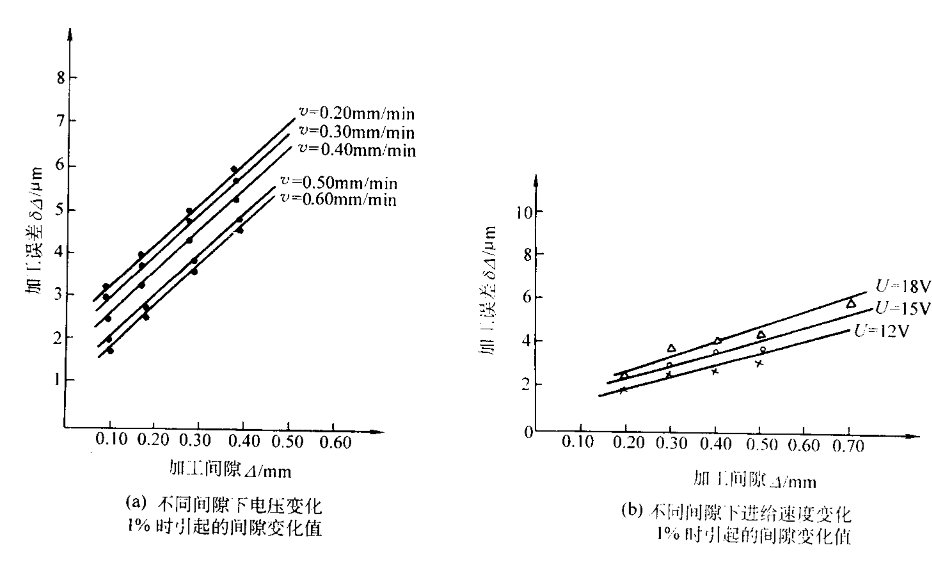
1）图 4.2-43 显示，同样加工速度下，加工电压 U 降低（即常数 C 减小），导致间隙减小，$|d\nu_a/d\Delta|$ 亦即集中蚀除能力增加，使整平比增加。

2）式（4.2-19）说明，加工电压降低，间隙相应减小，间隙变化值也相应减小，即尺寸分散度减小，重复精度提高。图 4.2-47 的试验结果证实了此规律。

图 4.2-47 还显示，电导率 κ 对加工精度的影响与加工电压 U 相同，均通过常数 C 起作用，因而其规律亦相似。

综上所述，在同一电解液下采用小间隙、高进给速度、低电压、低浓度加工，其集中蚀除能力较强，散蚀能力较弱，间隙均匀性较好，间隙受参数变化影响较小，因此整平比高、复制性好，最终导致加工精度提高。从图 4.2-47 分析，一般说来，以选用 $\Delta \leqslant 0.20$ mm，$v \geqslant 0.60$ mm/min，$C \leqslant 0.10\ mm^2/min$ 的加工参数为好。

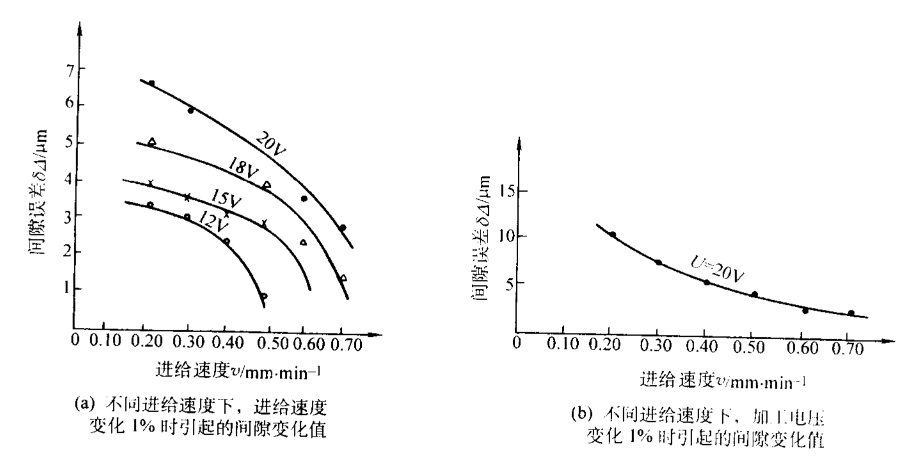
钝性电解液的非线性加工中 η 及 δE 呈非线性变化，混气电解加工中的 κ 也呈非线性变化，因此 C 值均不是常数，故不能完全套用上述规律。



(a) 不同间隙下电压变化 1% 时引起的间隙变化值　(b) 不同间隙下进给速度变化 1% 时引起的间隙变化值

图 4.2-45　加工间隙大小对自身分散度的影响

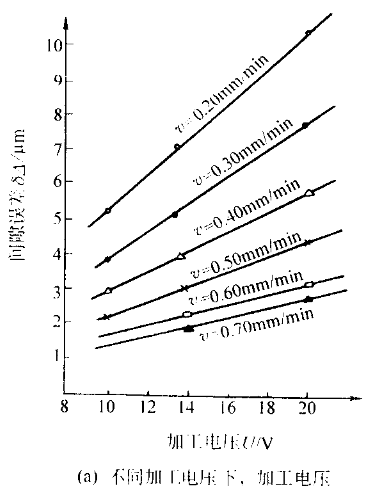
试件：TC9；电解液：5% $NaClO_3$ + 3% NaCl；T = 20℃；P = 0.6 MPa



(a) 不同进给速度下，进给速度变化 1% 时引起的间隙变化值　(b) 不同进给速度下，加工电压变化 1% 时引起的间隙变化值

图 4.2-46　进给速度对间隙分散度的影响

试件：TC9；电解液：5% $NaClO_3$ + 3% NaCl；T = 20℃；P = 0.6 MPa



(a) 不同加工电压下，加工电压变化1%时引起的间隙变化值

(b) 不同加工电压下，进给速度变化1%时引起的间隙变化值

图 4.2-47 加工电压对间隙分散度的影响

试件：TC9；电解液：5% $NaClO_3$ + 3% NaCl；T = 20℃；P = 0.6 MPa

4.3 提高加工精度的工艺途径

通过分析电解加工误差的成因可以看出，提高电解加工精度的根本途径是改善电解加工间隙的理化特性，即提高阳极溶解的集中蚀除能力，降低散蚀能力，同时改善间隙内电场、流场、电化学参数的均匀性和稳定性，以及缩小加工间隙。

迄今为止，在实践中行之有效的提高加工精度的主要技术途径和措施概括如下。

4.3.1 采用钝性电解液，包括低浓度复合电解液

如前所述，采用钝性电解液对提高铁基合金和模具钢、不锈钢的集中蚀除能力有显著效果，钝性电解液已成为模具电解加工的基本电解液，但对于钛合金、高温耐热合金等重要电解加工材料，效果却不十分明显。由于钝性电解液在提高加工精度方面适应对象范围较窄，加之生产效率较低，加工过程中电解液组分有所变化，需要经常调整，因而未能普遍用于生产。其中，$NaNO_3$ 电解液在英国采用得较多，低浓度复合 $NaNO_3$ 电解液在我国的钛合金叶片加工中采用得较多，其采用也出于改善设备腐蚀状况及提高加工表面质量的考虑。

4.3.2 采用混气电解加工

这种工艺途径可以普遍提高集中蚀除能力、提高整平比，较大幅度地减小遗传误差，在毛坯余量偏小，允差偏大的零件中获得了较好的使用效果。不过由于间隙中两相流的均匀性和稳定性较难控制，导致加工尺寸分散度较难控制，加之生产效率也有所降低，气液混合系统较复杂，特别是气液混合器的设计和制造难度较高，因此我国仅在叶片加工这类整平比矛盾较突出的零件中大量选用，在锻模类尺寸精度要求不甚高的零件中也有所采用，但没有得到进一步的发展和扩大应用。

$NaNO_3$ 电解液高压混气电解加工工艺综合了二者优点，可得到较高的加工精度，但工艺更为复杂，只在少数较高精度的锻模制造中得到局部应用，也未得以大范围推广。

4.3.3 小间隙加工、大间隙冲刷、周期供电加工

这种工艺途径可以获得很小的加工间隙，放宽了对流场的要求，加工精度和稳定性明显提高。由于大间隙冲刷占用时间而影响生产率，且设备较复杂，只有俄罗斯在小型零件加工上采用。

现将较成熟的、在生产中可以选用的提高电解加工精度的技术措施总结、归纳列于表 4.2-29。

表 4.2-29 提高电解加工精度的措施

因素	措　　施
工件	1）毛坯余量均匀化 2）正确进行热处理，使得材料组织均匀，晶粒细化，消除残余内应力，加工面除锈除油（可喷砂处理） 3）正确选用定位基准及导电面
阴极	1）正确设计流场形式，对深度/截面比较大的型腔或形状较复杂的型腔，尽量采用反流式流场，合理布局流道，保证流场均匀 2）正确设计型面，确保阴极型面或抛光刃边的制造精度及表面粗糙度 3）绝缘可靠，密封良好
夹具	1）提高定位精度和可靠性 2）采用耐蚀性好、刚性强的材料及结构 3）正确设计流道并确保密封良好 4）正确设计导电系统，确保不过热
电解液	1）选用合适的钝性电解液或复合电解液 2）合理选定浓度，必要时采用低浓度 3）必要时采用混气电解加工
加工参数	1）尽量缩小加工间隙，并使初始间隙尽量接近平衡间隙 2）适当降低加工电压 3）适当提高阴极进给速度 4）适当加背压 5）控制电解液温度恒定

但是，上述措施均未能从根本上改变直流电解加工工艺的散蚀能力及加工间隙偏大的特点，因此不可能完全解决电解加工的精度问题。

20 世纪 80～90 年代，主要目的在于提高电解加工精度的高频、窄脉冲电流电解加工、展成法三维表面电解成形、复合电解加工等技术相继被研究开发，飞速发展的计算机科学技术在电解加工中得以应用并获得了重要进展，这些新技术的诞生、发展提供了提高电解加工精度的崭新途径，为探索解决电解加工精度问题展现了良好前景，电解加工有望提高到精密加工的水平。



5　电解加工表面质量

电解加工表面质量是指零件经电解加工后其表面及表面层的几何、物理、化学性能的变化，又称电解加工零件表面完整性。其内涵包括两部分：一是指加工后零件表面粗糙度、波纹度和几何纹理的改变；二是指零件表面层材料组织、性能的改变，即在加工过程中受机械、物理、化学、电、热和微观冶金过程的作用，使表面层材料组织、性能发生的变化。

零件表面质量不仅影响本身的工作性能，一些关键零件还影响、甚至决定整台设备的使用性能，包括可靠性和使用寿命。从总体上看，电解加工表面质量优于切削加工及不少其他类型的特种加工，但当加工条件选择不妥时，也会出现表面质量问题，影响零件的性能及使用。因此，研究电解加工表面质量很有必要。

5.1　电解加工表面质量的特点

电解加工的机理完全不同于机械切削加工，因此电解加工零件的表面层形成、表面质量及其影响因素都有特殊性。与一般机械加工零件比较，电解加工零件的表面质量有下列主要特点。

1）电解加工基于阳极溶解原理去除金属，作为“刀具”的阴极与工件不直接接触，没有宏观“切削力”和“切削热”的作用，因此工件表面不会产生像切削加工过程中所形成的塑性变形层（冷作硬化层），也不会产生残余应力，更不会像电火花、激光加工那样在加工面产生再铸层，相反还会将原有的变形层和残余应力层去掉。在一般电解加工过程，工件表面的金相组织基本不发生变化，只是在某些条件下显微硬度略有改变。

2）切削加工的表面粗糙度主要反映在与刀痕垂直的方向上，一般而论，其表面和表面层质量在刀痕平行方向和刀痕垂直方向不尽相同。电解加工没有“刀痕”问题，阳极溶解不存在方向特征，故电解加工表面质量在各个方向上大体相同，表面粗糙度、几何形貌与切削加工有很大差别。

3）对比切削加工，影响电解加工宏观表面质量的因素更多，不是独立线性影响，而经常是多种因素的综合作用。例如，表面粗糙度就和工件材料、电解液组成以及工艺参数（特别是电流密度）的综合匹配很有关系。匹配得当，可以得到镜面等级的表面粗糙度；而匹配不当，则不仅表面粗糙度变差，甚至出现某些金相缺陷。

4）由于基于电化学阳极溶解原理，在电解加工过程中，各种因素匹配恰当，可以获得比切削加工好得多的微观表面质量；如果匹配不当，如电解液组成有误，或加工参数选择不当，电解液流场设计欠妥，则电解加工可能产生某些表面缺陷，如表面点蚀、晶间腐蚀、表面渗氢等，对零件使用寿命、疲劳强度会产生严重影响。

5.2　电解加工表面粗糙度及其影响因素

从微观角度分析，由于被加工材料各处皆为非均质分布，对应各处电解加工的电化当量及阳极电位不相同，造成电解去除速度不同而形成加工表面有微观几何凸凹，即表面粗糙度。例如，一般工件材料都是多元金属的合金，其组织由两种或多种晶粒组成，不同晶粒的电化当量及阳极极化电位都有差别，对应晶体产生不同的阳极溶解速度，从而形成微观几何不平度。即使工件材料由同种晶粒组成，但由于晶粒结构的差异，如原子间距的差异，其电化当量也会有差异，同样也会产生微观不平度。基于上述电解加工表面粗糙度形成机理的分析，并由众多试验研究所证明，其表面粗糙度的高低与工件材质、电解液组成及工艺参数密切相关，它们匹配得当可以得到令人满意的表面粗糙度。

影响电解加工表面粗糙度的主要因素如下。

1）工件材质。在相同或相近的工艺条件下，不同的工件材质可能得到完全不同的电解加工表面粗糙度。例如，以 NaCl 电解液加工一般钢材，可以获得 $R_a = 0.8 \sim 3.2\ \mu m$ 的表面粗糙度；加工合金钢却可得到 $R_a = 0.8\ \mu m$；而加工钛合金，只能得到 $R_a = 6.3\ \mu m$。还应当指出，即使同样的材质，热处理状态不同，也会影响表面粗糙度。如果热处理后材质更均匀，则电解加工的表面粗糙度更低。

2）电解液的组成是影响电解加工表面粗糙度的重要因素。对于同样的材料，选择不同的电解液（包括成分、浓度、温度），加工表面粗糙度可能差异很大（见图 4.2-48）。以加工钛合金为例，选用 15% NaCl 水溶液，只能获得 $R_a = 2.5\ \mu m$ 的表面；而选用 6% $NaNO_3$ + 2.2% NaCl，却可以得到 $R_a = 0.63\ \mu m$ 的表面；又如加工合金钢，选用 NaCl 电解液可得到 $R_a = 0.8\ \mu m$ 的表面；而选用 $NaNO_3$ 加工，表面粗糙度大大降低，可以得到 $R_a = 0.32\ \mu m$ 的表面。研究与实践均表明，针对不同材料选择合适的电解液组成，是保证高加工速度、低表面粗糙度的首选工艺措施。

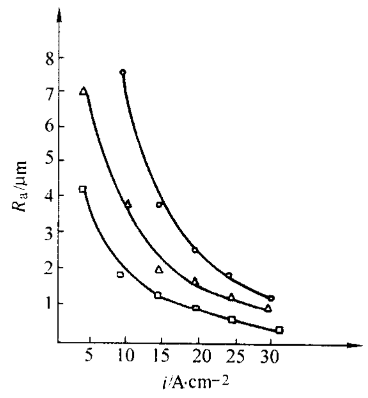


图 4.2-48　电解液成分及电流密度对表面粗糙度的影响
（工件材料为钛合金）
□ – 5% $NaNO_3$ + 2% NaCl；△ – 6% $NaNO_3$ + 2% NaCl；
○ – （12 ~ 15）% $NaNO_3$ + （4 ~ 5）% NaCl

3）电流密度对电解加工表面粗糙度的影响非常敏感。随着加工电流密度的提高，表面粗糙度 R_a 值迅速降低。对于某些材料，如钛合金，这一效果更加明显（见图 4.2-48）。电流密度高，电解去除速度也快，因此，选择尽可能高的电流密度，既可降低表面粗糙度值，又可提高加工速度，两者能完全协调统一。

4）电解液流场对表面粗糙度也有重要影响。流速不够，则加工表面粗糙度变差。保证适当高的流速且保证流场参数均匀分布，如施加适当的出口背压，对于降低表面粗糙度值有着显著作用。

5）脉冲电流电解加工比一般直流电解加工更利于降低表面粗糙度值。加工电流以脉冲式变化，引起加工间隙通道内电解液压力波动，对电解液有扰动作用，从而强化、均匀流场，减小极化、改善阳极溶解的过程，很有利于降低表面粗糙度值。混气电解加工也有类似的效果。

综上所述，针对不同工件材料选择合适的电解液组成，采用合理的工艺参数，如采用小间隙、高电流密度条件加工，合理设计流场，或采用脉冲电流或混气电解加工，都是降低表面粗糙度的有效措施。

5.3　电解加工可能产生的表面缺陷及相应防止措施

一般地讲，若工件材料与电解液匹配得当，加工参数选择合适，电解加工不但可得到良好的表面粗糙度，还可以获

得良好的表面层质量，比一般切削加工所得到的表面质量更好。反之，则可能在加工表面产生缺陷而影响零件性能。在电解加工过程中可能产生的表面缺陷及其相应防止措施如下。

（1）晶间腐蚀

当电解液成分、浓度选用不当或加工电流密度过低时，显微观察加工表面的金相组织可以发现，晶粒周界可能被腐蚀出缝隙，这是电解加工中容易出现的、程度不同的表面缺陷——晶间腐蚀，它对零件的疲劳寿命有重大影响，要特别注意防止晶间腐蚀产生，或在后续工序中去除晶间腐蚀层。例如，机械抛光是通常采用的有效方法之一；对于轻微晶间腐蚀，采用表面喷丸处理就可以达到去除晶间腐蚀层、强化零件表面，提高零件疲劳强度的要求。

晶间腐蚀的产生原因一般可解释为：晶粒周界的成分常常与晶体基体的成分有差别；同时晶间原子受到周围不同晶粒中的晶格位向不同原子的作用，晶间中的原子排列就不像晶粒内部的原子排列那样有规则，即晶间中的原子具有更高的位能而使其电极电位更负，因而更容易优先被阳极溶解，即形成晶间优先腐蚀。研究与实践表明，以下因素对晶间腐蚀有重要影响。

1）电解液成分与浓度　例如，NaCl 电解液容易产生晶间腐蚀，而 $NaNO_3$、Na_2SO_4 电解液则不易，甚至不会产生晶间腐蚀；电解液成分相同，浓度越高越容易产生晶间腐蚀。

2）电流密度　晶间腐蚀经常发生在低电流密度条件下，电流密度越高，越不易产生晶间腐蚀，或者说晶间腐蚀的深度越浅。

3）电流波形　脉冲电流电解加工不易产生或者只会引起深度很小的晶间腐蚀。

4）材料组成及热处理状态　不同的材料，产生晶间腐蚀的难易程度不同；如果热处理使材料组织均匀、晶粒细化，则有利于防止或减轻晶间腐蚀。

综上所述，对影响晶间腐蚀的因素应该综合考虑。以 NaCl 电解液加工镍基耐热合金为例，在高电流密度条件下，晶间腐蚀深度仅为 0.008 mm（图 4.2-49）；而在低电流密度条件下，晶间腐蚀深度达 0.05 mm（图 4.2-50）；如果选用 $NaNO_3$ 电解液加工镍某合金，在高电流密度条件下则不会产生晶间腐蚀。一般而论，选用钝性电解液，如 $NaNO_3$、Na_2SO_4，采用高电流密度，可以减小甚至防止晶间腐蚀发生。

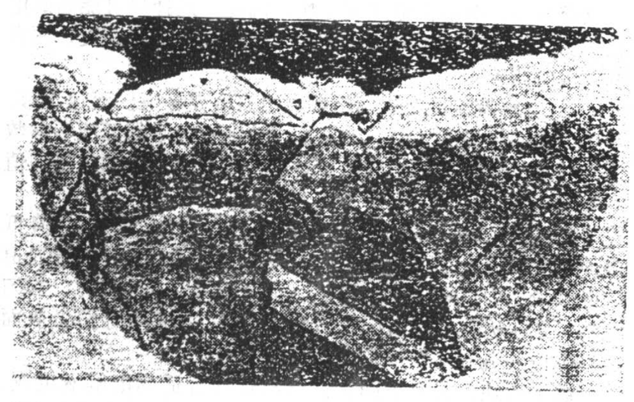


图 4.2-49　轻微的晶间腐蚀
（NaCl 电解液加工镍基合金，高电流密度，500×）

（2）点蚀、剥落

当工件材料的化学成分或组织结构不均匀时，材料中各相的电极电位不同，因此阳极溶解的先后顺序不同，称作选择性溶解。如果有某个或某些电极电位较负的相发生显著的优先溶解，则可能引起“选择性腐蚀”的缺陷，其主要形式

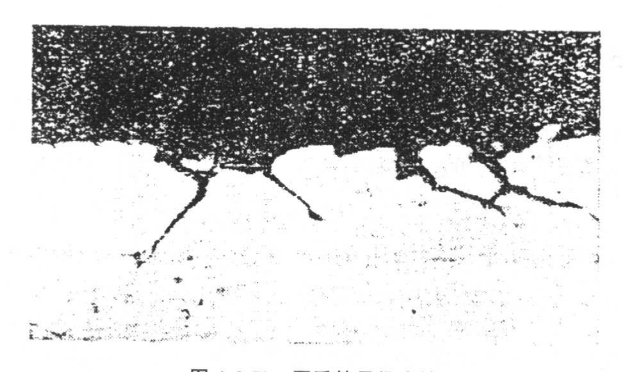


图 4.2-50　严重的晶间腐蚀
（NaCl 电解液加工镍基合金，低电流密度，500×）

包括点蚀和剥落。

如果材料中优先溶解的是含量较少的次要相，则优先溶解的部位形成凹洼的斑点腐蚀坑，称作点蚀。如果优先溶解的是基本相，其余的相将形成凸起物残留在工件表面；随着基本相继续溶解，这些凸起物以残渣的形式脱落被电解液冲走，通常称作剥落。点蚀和剥落这类选择性非均匀溶解所造成的缺陷，均使零件表面粗糙度恶化而严重影响零件使用性能。

点蚀与剥落产生的影响因素和晶间腐蚀产生的影响因素相似，防止措施首先同样包括选择合适的电解液，特别是多元复合电解液，以使各相能均匀溶解；其次是在高电流密度下加工；阴极、夹具设计要防止加工表面的二次腐蚀，因为二次腐蚀一般在低电流密度下进行，而低电流密度最容易引起点蚀；要选择适当的工件材料热处理方法使材质组织均匀，也能有效防止产生选择性腐蚀。通常电解加工钛合金易出现点蚀，而加工铸造材料则易出现剥落，故对它们应特别注意选择电解液与工艺参数。

（3）流痕

由于间隙中流场参数（电解液流速、压力）分布不均匀，特别是当不均匀程度较大时，会在电解加工表面形成流痕。流痕方向大致和液流方向一致，最容易发生在流场参数急剧变化的地方，如间隙的电解液入口和出口端。如果在间隙局部产生空穴或缺液、或电解液停滞流动、或产生旋涡等意外情况，则在对应处工件表面可能产生较为严重的流痕，甚至发生短路。防止流痕产生主要从改进流场设计着手，如正确设计阴极与夹具、工件加工表面所构成的电解液通道，特别是间隙的进口与出口端，应尽量避免或减小液流通道的急剧变化，最好将液流通道由进口到出口全程设计成收敛型，或在出口端适当施加背压等。采取以上措施，都能有效地均匀流场，减少或防止流痕的产生。

5.4　电解加工表面质量对零件疲劳强度的影响

电解加工已经广泛应用于制造航空发动机的压气机叶片、涡轮叶片以及火箭发动机的整体叶轮，这些零件均承受高速旋转条件下的循环载荷及温度急剧变化所引起的热应力，因此要求零件具有可靠的疲劳强度。电解加工锻模也存在类似问题。

一般地讲，影响零件疲劳强度的因素包括零件材料特性及热处理状态、零件几何结构及尺寸、零件受载状态及变化、零件表面质量等因素。实验研究与工程实践均表明，零件表面质量，即表面状态和表层性质对零件疲劳强度有着重要的、在一定意义上甚至是决定性的影响，因为在大多数情况下，零件的疲劳裂纹都首先出现在零件表面。其原因可以归纳如下。

1）零件表面容易产生应力集中源。例如零件结构上的沟槽、尖角过渡部位、加工过程中的微观不平或刀痕等，都



会形成应力集中而导致疲劳裂纹。

2）表面层的应力分布或晶粒组织结构条件。例如表面拉应力，或表面层晶间的微观裂纹（晶间腐蚀），都极易在循环载荷下首先导致疲劳裂纹。

3）当零件承受弯曲或扭转载荷时，表层承受的应力最高。

4）零件表层首先受到外部介质如腐蚀性气、液体的作用。

前两条原因与加工过程有关，后两条原因涉及零件工作条件。下面将电解加工与一般机械切削加工作比较，讨论表面质量对疲劳强度的影响。

就一般规律而言，机械切削过程会在加工表面留下刀痕及刀尖形成的微观不平，都有可能形成应力集中源使疲劳强度降低；电解加工却可以去除这些刀痕而使疲劳强度提高。要指出的是，如果电解液选择不当，则可能在零件表面形成晶间腐蚀而产生非常危险的应力集中源，使疲劳强度降低。

另一方面，机械切削过程会引起零件表面的塑性变形和热效应作用，直接的影响是在零件表面导致冷作硬化、残余应力和表面层时效、软化等不同效应，从而对疲劳强度产生不同影响。一般认为，如果加工后在零件表面产生残余压应力，对提高疲劳强度有利；而电解加工表面不会产生冷作硬化和表面应力。就此而言，对疲劳强度无显著影响，但如果前道工序产生表面拉应力，而电解加工去除了表面拉应力分布，会对提高疲劳强度有利。

就表面粗糙度对零件疲劳强度的影响而言，一般认为，电解加工的表面粗糙度值低于机械切削（车削、铣削）加工的，而高于磨削加工的，故在同样条件下，电解加工零件的疲劳强度高于机械切削加工的，而低于磨削加工的。特别地，如果电解液选择不当，或加工电流密度偏低，则电解加工表面粗糙度很差，甚至产生表面缺陷，将导致零件疲劳强度大为降低。

对于模具钢，由于电解加工表面质量优于切削加工和电火花成形加工，不存在冷作硬化层、热再铸层及由此而诱发的显微裂纹，表面粗糙度值也较低，因此电解加工的锻模热疲劳强度较高，其工作寿命显著高于仿形切削及电火花加工的热锻模。

对于如钛合金等某些敏感材料，在电解加工过程中工件表面容易渗氢，严重者甚至出现“氢脆”，影响疲劳强度。试验研究表明，选择合适的电解液成分和加工参数（适当高的电流密度和电解液高流速），可以大大降低渗氢量，低于国家标准规定值；但有时难于控制，局部表面层渗氢量可能超标，所以最可靠的办法还是在电解加工后进行机械抛光，去除渗氢层或渗氢含量较高的表面层。

综上所述，电解加工表面疵病，特别是诸如晶间腐蚀、麻点、渗氢等缺陷，会导致零件疲劳强度降低。为了提高电解加工零件的疲劳强度，可以采取如下相应措施。

1）对不同材料，选择适当成分的电解液，可以获得低表面粗糙度值、无晶间腐蚀、无表面疵病的高表面质量工件，有利于提高疲劳强度。

2）选择最佳工艺参数，如高电流密度，电解液高流速，适当的电解液温度等，都可以达到高表面质量，提高疲劳强度。

3）对电解加工的零件表面进行机械抛光（如毡轮抛光、振动抛光等）或表面喷丸强化处理，都会在表面产生压应力，有利于提高疲劳强度。

4）采用 $NaNO_3$ 电解液，脉冲电流电解加工高温耐热合金（如镍基合金、不锈钢等）以及模具钢，具有很好的表面质量，可获得较高的疲劳强度。

编写：云乃彰（南京航空航天大学）
陈远龙（合肥工业大学）
张永俊（南京航空航天大学）
徐家文（南京航空航天大学）



第 3 章　电解加工设备

1　电解加工设备的总体论述

如前所述，电解加工是电化学、电场、流场和机械各类因素综合作用的结果，因而作为实现此种工艺的手段——设备必然是多种部分的组合，各部分具有相对独立的功能和特性，属于不同的专业范畴，但又是在统一的产品工艺要求下形成一个相互关连、相互制约的有机整体。这就决定了电解加工设备的特殊性、综合性和复杂性。要研制出一台高性能的设备或运用好一台设备，都必须从系统工程的角度建立全面的、综合的整体概念。设计者还必须对工艺的特点、要求以及由此带来的设备的特殊性有较全面、深入的了解和掌握，方能设计出能较好地满足生产需要的、实用性强的设备。本章将全面、深入地论述电解加工设备的构成、特点、设计和选型的原则，并介绍已成功运用的有代表性的方案。

1.1　电解加工设备的组成和功能

电解加工的全套设备组成如图 4.3-1 所示，包括机床、电源、电解液系统以及相应的操作、控制系统及控制软件，工艺装备也可作为机床的独立附件。图 4.3-2、图 4.3-3 是两类常用的电解加工机床的示例。

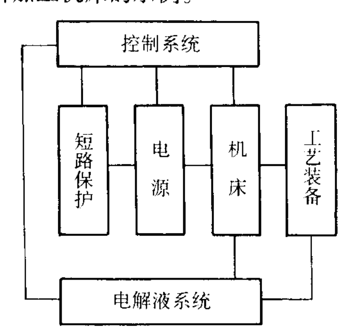


图 4.3-1　电解加工设备的组成框图

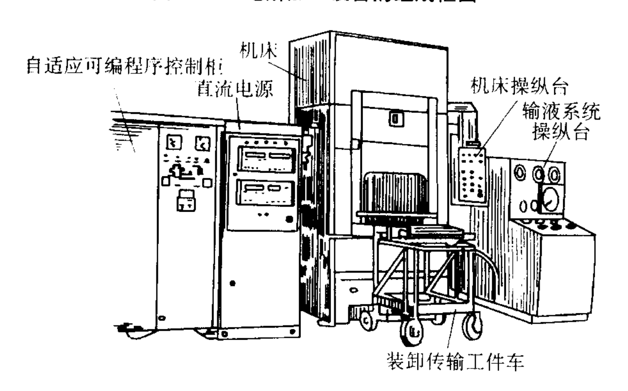


图 4.3-2　立式单头电解加工机床

机床（含工艺装备）是设备的主体，是进行电解加工的场所，其主要功能是安装、定位工件和工具阴极，按需要送进工具阴极，以及将加工电流和电解液输送到加工区。其他组成部分的功能分别是：电源以一定的方式提供工件发生阳极溶解需要的电能；电解液系统存储电解液，以给定的温度、压力和流量将电解液输送到加工区并对电解液进行净化以及电解产物的处理；操作、控制系统对加工过程进行程序及参数的控制，保证各组成部分之间运动及运动程序的协调，并按预选的参数提供所要求的阳极溶解的条件，或按工艺的需要进行参数的自适应控制，使加工过程始终保持最佳的阳极溶解状态。

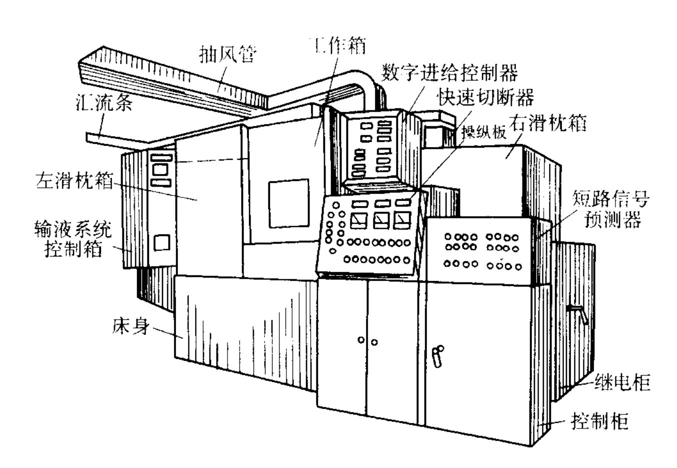


图 4.3-3　卧式双头叶片电解加工机床

1.2　电解加工设备的分类和选型

电解加工设备主要按机床加工对象的类型区分，如图 4.3-4 所示。其中尺寸成形加工的专用机床占的比例最大，通用机床特别是光整加工机床近年亦有所发展。

设备的选型主要依据加工对象的类型和特点以及加工方法的种类而定，例如叶身长度在 500 mm 以内的叶片多选用卧式双头机床，可以减少加工变形，并提高效率；而超过 500 mm 的叶片由于总电流过大则以大型单头机床为宜。其他类型的专用机床亦多为卧式，这是由于其工件加工面及安装定位面的位置和形状所定，例如膛线机床、镗孔机床的加工行程甚长，选用卧式机床其电极为水平送进，行程不受限制且布局较为稳定；机匣机床亦多选用卧式，这是由于机匣扁平，重量和外廓尺寸大，水平安装时定位、分度等均较为稳定且工作箱可以全敞开，装卸工件、电极时可以直接起吊、调整工具位置亦较方便。通用机床则多为立式，其占地面积较小，刚性好，流场分布较为均匀，产品适应面较宽。为确保小而恒定的间隙，尺寸加工用的机床多选用工具进给的类型，而光整加工的蚀除速度甚慢，去除余量小，加工间隙变化甚微，因而多选用固定工具的类型。

1.3　电解加工设备的总体设计原则

进行总体设计时，首先必须确认设备的工作条件，加工对象的特点和基本要求。这是总体设计的基础和出发点；其次就是要确定设备主要部分的功能、组成、基本方案和相互间的匹配关系，在此基础上进行总体布局；然后根据设计任务书的要求计算、选定设备的总体规格、性能、技术要求；最后定出总体方案。由于电解设备各部分的相对独立性较大且专业领域各异，因此总体设计对于确保设备的整体性能和水平是极为重要的一环，特别是各组成部分之间的相互匹配、协调尤为重要，这是电解加工设备设计与一般机床设计的重大区别之处。20 世纪 60 年代的电解加工设备以及当前某些在生产现场使用的设备，由于未充分考虑机床与电源、电解液系统之间的关系，性能匹配不当，因而整体性能较差，使用效果受到较大的影响，不能充分发挥出电解加工的优越性。70 年代中后期，由于认识了上述规律，正确进行了总体设计，因而整体性能较好，使用效果明显提高。



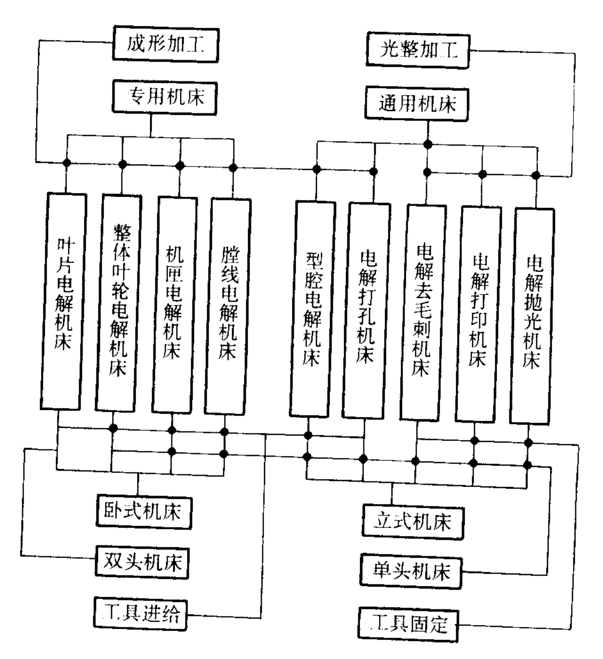


图 4.3-4 电解加工机床分类

下面介绍总体设计的依据和出发点。

1.3.1 电解加工设备的特殊工作条件以及由此带来的特殊问题

1）工作环境较恶劣　机床工作箱内和输液系统的零部件均直接接触腐蚀性电解液，导致金属零件的化学或电化学腐蚀，其中阳极导电系统的电化学腐蚀问题尤为突出。除此而外整套设备均处在某些腐蚀性气体的环境中，可能导致金属零件的锈蚀，特别是电器元件的锈蚀。

用 $NaNO_3$ 电解液加工高铬钢时会产生 Cr^{6+} 和 NO_2^- 离子，含量超出一定值后有致癌危险。

工作箱内氢气含量超过一定值时可能引起爆炸。采用含 $NaClO_3$ 电解液时，当其干燥后呈结晶状，有自燃危险。

2）大的加工电流　电解成型加工时总电流可高达数万安培，带来大电源控制的稳定性问题，如直流电源的电压、电流波动、脉冲电源的大电流关断的可靠性以及大电流的传导中发热及能耗等问题。

3）承受复杂的动态负荷

① 极间高速气液两相流　如前所述，极间高速的两相流导致主轴头承受相当大的动态负荷，当极间出现扰流时还叠加有交变负荷，特别是在脉冲电流加工时极间压力波振荡产生连续的交变负荷。

② 极间交变的强电磁场，大的加工电流导致大的电磁力。直流加工时，其上可能叠加 50～300 Hz 的交变电流分量；脉冲电流加工时，有频率高达 kHz 级的大电流通断过程；短路时会产生 0.5～20 kHz 的火花振荡电压分量。上述极间扰流也会引起电压、电流的振荡，这些因素均会导致交变的电磁力并对电气系统产生一定的干扰。

③ 小的动态变化的极间间隙　对此种状态控制不当就会导致阳极局部钝化，使加工中断或极间发生火花、短路。

1.3.2 对电解加工设备的基本要求、总体设计中应考虑的主要问题及遵循的主要原则

基于上述特殊的工作条件，对电解加工设备提出了下列基本要求。

1）设备的耐蚀性好　机床工作箱及电解液系统的零部件必须有良好的抗化学和抗电化学腐蚀的能力，其抗蚀能力应达到在 20% NaCl 溶液中，50℃的条件下不受腐蚀。全套电器系统及设备接触腐蚀性气体的表面均需有可靠的防蚀能力。特殊的设备还需耐酸、碱腐蚀。国外设备的耐蚀要求甚为严格。

2）机床刚性强　早期电解加工机床刚性较弱，当时认为电解加工工具与工件不接触，受力较小因而不需要高刚度。随电解加工向大型、精密发展，采用大电流、高电解液压力、高流速、小间隙加工，以及脉冲电流加工的应用，越来越使电解加工机床在较大的动态、交变负荷下工作，要达到高精度、高稳定性就必须有较强的静态和动态刚性。由于对电解加工机床动力学尚未深入研究，因而尚无实用的电解加工机床的动态刚性计算模式。当前国外通行的指标是在额定的主轴等效静负荷下，滑枕最大悬伸时，阴极安装板轴向变形位移 0.10～0.20 mm 或 0.001 mm/kN，侧向变形位移≤0.05 mm。

3）进给速度特性硬、调速范围宽　为确保动态交变负荷下小间隙加工的稳定性，进给速度从空载到满载变化量应小于 0.025 mm/min，采用液压送进时，低速爬行量应小于 0.01 mm。最低进给速度为 0.10 mm/min，最高空程速度为 500 mm/min。

4）较高的机床精度　总的是要确保工具阴极与工件之间相对位置准确，这是采用电极 CAD/CAM 技术的基本条件，国外多采用此法。国内则采用反拷电极试修法，因而主要要求定位稳定、可靠，重复精度高，而对位置的绝对精度则没有严格要求。

机床精度指标主要有下列三项：①滑枕全行程内阴极安装板相对工作台的位置精度（平行度、垂直度和同轴度）；②工作台、阴极安装板定位面平面度；③工作台、阴极安装板上定位孔、定位键槽精度。

以上三项要求在国外先进机床中一般均控制在 0.025 mm/300 mm 内。恒参数控制精度一般为 1%。

5）大电流传导性好　大电流传导是电解加工设备中的重要特点，导电系统线路压降大热损就大，传输效率低。此问题在脉冲电流加工中尤为严重，而且还会引起波形失真，故应采用低电感导线。一般汇流排、电缆及接头的温度应小于 60℃。

6）电气系统抗干扰性强　滑枕进给的控制和数字显示系统应能抗本机加工电源大电流通断和极间火花的干扰；电源短路保护系统能抗周围环境的火花的干扰。机床电气系统抗干扰能力强，则加工稳定性就好。

7）安全、可靠　必须杜绝工作箱内氢气爆炸（工作箱内氢气含量应低于 0.25%），还应防止有害气体逸出。所有电器柜要防潮及防止腐蚀性气体渗入。阳极与机床间绝缘必须可靠。双头机床的阴极应与机床绝缘。

8）配套性好　设备应成套，各部分性能应相互匹配以得到最佳工作条件。国外先进设备出厂时均已配套，国内则尚未做到这点，除给用户带来不便外，还会影响整套设备的使用效果。

9）较大的通用性　电解加工的对象大都属于小批量多品种生产，因而机床的通用性会影响到设备的利用率和经济性，特别是电解设备成本较高，一次投资较大，因而应足够重视其通用性。国内机床的通用范围较窄，例如叶片机床一般均一台加工一级，而英国 R.R. 公司的叶片全自动生产线上的电解加工机床，一台可以更换加工六种不同级别的叶片。换级时间短，柔性较好。

除上述技术要求外，还应充分考虑设备的经济性，应有低的成本性能比。由于电解加工设备一次性投资较大，如果一味追求高性能而忽视其经济性，就会因成本过高而影响其推广面和市场效果，在市场竞争中处于劣势。

1.3.3 电解加工设备规格、性能参数的计算及选用的依据

电解加工设备的各部分的相对制约关系体现在设备规



格、性能参数的计算和选用上。设备的参数很大程度上取决于用户提出的加工条件和工艺参数，这些是根据加工对象的精度、粗糙度、效率的要求以及材料、形状的特点综合选定的，因而一定的加工要求是决定设备性能、规格的原始依据。

由于电解加工间隙内电场、流场、电化学过程的理论计算结果与实际工程应用还有一定差距，它和外在的设备条件、设备参数的关系还只能在理论给出的定性规律指导下根据实践的经验来确定。因而设备参数定量的计算主要是依据经验公式估算，即便是国外先进的电解加工设备的设计也是如此。下面介绍的计算方法和估算公式是综合了国内外已使用的较先进、成熟而又简便的计算方式得出。其中的经验系数均选自国内外先进机床的设计数据，并为若干电解加工设备的设计、研制和应用所证实。其中选用的工艺参数在第1章和第2章中已有详述，此处只引用其结果。

1）额定电流　额定电流不但表示了电源的容量，而且也表示了设备总的加工能力，是决定机床滑枕头承载能力以及电解液泵的流量、净化系统规格的主要依据，因而是电解加工设备首先要确定的最重要的规格数据。其估算公式如下：

$$I = K_1 S_{max} i_{max} \quad (4.3\text{-}1)$$

式中，I 为额电电流，A；S_{max} 为设备最大加工面积，cm^2；i_{max} 为最大加工电流密度，A/cm^2；K_1 为电源使用裕度，一般应选用 1.5～2.0。

i_{max} 是计算额定电流的重要参数，必须综合考虑加工表面类型、尺寸范围、所要求的进给速度以及可能提供的电源容量等因素而选定，选用范围见表4.2-3，其中上限为高参数加工，所得到的表面质量较好，国外较多采用，但需要较大的机床承载能力、刚度和较高的电解液泵的流量及压力。国内限于设备条件，一般均采用低参数（下限）较多。

由于电解加工条件较恶劣，电解加工设备较昂贵，因而为确保较长的设备寿命，国外用户在选定额定电流时一般均有 $K_1 = 1.5 \sim 2$ 的裕度。国内用户为减少一次投资，普遍不考虑此因素，甚至超载使用，导致设备寿命降低，故障率增大，精度下降，这种做法是不合适的。

国内当前电解加工电源最大容量为 2×10^4 A，国外最大为 4×10^4 A。

2）额定电压　一般型面型腔加工中常选用 15～20 V；钛合金加工的分解电压较高，套料及小孔加工的电流密度较高，因而这两类设备选用 20～25 V 为宜。

3）滑枕头承载　这是确定床身、滑枕头基本结构和尺寸的重要依据，如前所述滑枕头的负载主要是间隙中电解液的反力以及极间电磁力，而这二项基本上都决定于加工电流。因而可根据额定加工电流来估算。

$$F_{max} = K_2 I \quad (4.3\text{-}2)$$

式中，F_{max} 为滑枕头最大静态承载，N；K_2 为推力电流比，N/A。

K_2 是反映加工电流与极间等效静态载荷的相对关系的等效系数，实质上是反映了加工电流与相应的电解液静态和动态压力以及此电流所产生的静态和动态电磁力的总和的关系。由于上述诸因素的复杂性，因而在实用中选用了此等效的方法。国外先进机床厂家的此等效系数选用如下：型面、型腔 4.5 N/A；套料、孔加工 1.5 N/A。

4）滑枕头进给速度　必须综合考虑用户要求的生产率、被加工材料、采用的电解液以及可选用的电源容量诸因素，根据第1章中所介绍 $v = \eta\omega i$ 的公式选取。为使用方便，其中量纲 ω 为 mm/min，$\eta\omega$ 为 $cm^2 \cdot mm/(A \cdot min)$，$i$ 为 A/cm^2。$\eta\omega$ 值在表4.1-3、表4.1-4、表4.2-12及图4.2-9等图表中已有列举，但为估算简便也可按表4.3-1选取。

表4.3-1　$\eta\omega$ 的选取　$cm^2 \cdot mm \cdot (A \cdot min)^{-1}$

加工材料		铁基金属		镍、钴基合金
电解液		NaCl	$NaNO_3$	通用（盐类）
电流密度	$i < 50\ A/cm^2$	2.2×10^{-2}	0.88×10^{-2}	约 2.0×10^{-2}
	$i > 50\ A/cm^2$	2.0×10^{-2}	1.0×10^{-2}	约 2.0×10^{-2}

5）电解液泵流量　此参数必须与加工电流合理匹配，还必须考虑到实际输送到加工区以及最小加工间隙处的有效流量，以确保此处有足够的与电流密度匹配的流速，一般情况为 6～30 m/s。根据流速等参数可计算所需泵的流量，或者也可按经验估算。

6）电解液泵压力　当全部流道确定后，为保证要求的电解液流量就必须有相应的最小电解液泵压力。对低电流密度或低压混气型面、型腔加工中一般取 0.4～0.5 MPa；高电流密度或高压混气加工取 1～2 MPa；深孔及套料取 0.8～3 MPa。一般国内采用的压力偏低，国外偏高，主要原因是国内高压耐蚀泵较少，而且相应的机床刚性、密封等均稍差。

7）离心机流量　国内未用此类净化设备，国外则普遍采用。英国 R.R. 公司是按设备的额定电流选取离心机流量，见表4.3-2所列。

表4.3-2　离心机规格

设备额定电流/A	离心机流量/$L \cdot min^{-1}$	离心机压力/MPa
5 000	12～25	0.3
10 000	35～50	0.3
20 000	50～83	0.4～0.5

8）板框压滤机　它可以进行在线过滤，但大多作为离线定时将污液压成干渣用，过滤面积系数选 6 m^2/10 000 A，过滤压力 ≤0.6 MPa。

9）板式热交换器　对于用自来水冷却电解液的热交换器，总面积系数选用 10 m^2/10 000 A，其工作条件：Q_1 为 220 L/min，T 为 35℃，电解液槽容量为 9～15 m^3。蒸气加热电解液的热交换器总面积系数为 0.36 m^2/10 000 A。

10）抽风机容量　抽风机容量是按法拉第定律计算，氢气生成速度为 79 L/（min·10 000 A）。空气中氢气含量的危险点为5%，取安全系数为20，则空气中氢含量应低于0.25%，故抽风机容量可根据加工电流的大小按 31.6 m^3/10 000 A 进行估算。

2　电解加工机床

2.1　机床的构成及特点

电解加工机床由床身、工作台、工作箱、滑枕头、进给系统、导电系统组成。电解加工机床是电解工艺的载体，先进的工艺通过先进的机床来实现，它又是新工艺从实验室走向工程化的桥梁，直接影响到新工艺在生产中应用的效果。在20世纪60年代到70年代初期，电解工艺得到大发展，70年代中、后期电解加工机床走向完善和定型，使这项新工艺在生产应用中取得良好的效果。美国 Anocut 公司的电解加工机床系列集中反映了这个时期电解机床发展潮流的主要特点。其典型的机床成为同类机床的样机，20世纪70年代 Anocut 机床的销售量占全世界的70%。至今世界各国商品化的电解加工机床的机械结构基本上还是受当时模式的影响。

电解加工机床趋于成熟和完善的主要标志如下。

1）机床和相应的系统已定型，能够较好地满足电解加



工成批生产的要求。特别是突破了“稳定关”，达到了类似机械加工设备的稳定程度。

2）主机和各系统已配套，构成了一个完整的体系。国外商品化的电解加工设备均已配套供应。

3）机床和相应系统已开始系列化、模式化、并发展了一批通用电解加工机床。

特种加工机床与工艺联系极为紧密，成功的设计必须满足工艺的特殊要求，具备相应的特殊功能。如前所述电解加工设备的中心问题是如何在腐蚀性、干扰性较强的环境中，在较大的动态载荷及加工电流条件下稳定地维持给定的小加工间隙。体现在机床上主要是刚性和耐蚀性，这是确保电解加工机床稳定的两大关键。电解加工机床的特殊功能是传导大电流以及输送高速流动的腐蚀性电解液。总体布局上要注意机床与电源、电解液系统正确匹配的问题。结构上要解决好刚性、耐蚀性、密封以及电流传输的发热等问题，因而电解加工机床结构较为复杂。在选材特点上则以耐蚀材料居多，对定位件则既要求耐蚀又要求高精度和高稳定性，由此导致制造难度较大，需要采用某些特殊工艺，相应的制造成本亦较高。

由于电解加工机床性能、规格与加工产品的特殊要求紧密相连，故其通用范围较窄，属于小批量、多品种类型，因而一般均是根据用户订货专门制造，在通用模式的基础上，用户可以根据其特殊需要而增、减某些功能，任选某些部件。这也是其成本较高的原因之一。

2.2　电解加工机床总体方案的制定

在制定总体方案中主要是确定总体布局、各部件之间规格与容量上的匹配关系以及各部件的相关接口方式。

2.2.1　总体布局的类型

总体布局是指机床各部件之间相互配置的方式。总体布局中应考虑的主要问题是如何有利于实现机床的主要功能，满足工艺的需要，以最简便的方式达到所要求的机床刚度、精度，同时还要可操作性好，便于维护，安全可靠，性能价格比高。电解加工机床总体布局的主要类型见表4.3-3。

表4.3-3　电解加工机床总体布局的主要类型

<table>
<tr><th>类别</th><th colspan="2">名称</th><th>示意图</th><th>滑枕进给方式</th><th>工作台运动形式</th><th>最大承载能力/kN</th><th>额定电流/A</th><th>应用范围</th></tr>
<tr><td rowspan="4">立式机床</td><td colspan="2">框型</td><td></td><td rowspan="2">滑枕在上部，向下进给式；滑枕在下部，向上进给式</td><td rowspan="2">固定式；X，Y双向可调整式；旋转分度式</td><td>250</td><td>5 000
10 000
20 000
40 000</td><td>中大型模具型腔，大型叶片型面，大型轮盘腹板，大型链轮齿形，大型花键孔，电解车</td></tr>
<tr><td rowspan="3">C型</td><td>中型</td><td rowspan="3"></td><td>25</td><td>1 000
3 000
5 000</td><td>中小型模具型腔；整体叶轮型面、中型孔、异型孔等套料加工</td></tr>
<tr><td>小型</td><td rowspan="2">滑枕在上部向下进给式</td><td>固定式</td><td></td><td>300
1 000</td><td>小孔
小孔型孔</td></tr>
<tr><td>电射流</td><td>固定式</td><td></td><td>1.5
10</td><td>微孔</td></tr>
<tr><td rowspan="3">卧式机床</td><td colspan="2">卧式三头</td><td></td><td>滑枕水平进给</td><td>固定式</td><td>45</td><td>10 000</td><td>同时加工叶片型面及根部、凸台转接端面</td></tr>
<tr><td colspan="2">卧式双头</td><td></td><td>水平进给；向上或向后倾斜方向进给</td><td>固定式</td><td>90</td><td>3 000
5 000
10 000
20 000</td><td>叶片型面，腹板</td></tr>
<tr><td colspan="2">卧式单头</td><td></td><td>水平进给</td><td>固定式旋转分度式</td><td>90</td><td>10 000
20 000</td><td>机匣内外环底型面、凸台、型孔、筒型零件内孔、大型煤球轧滚型腔、深孔、炮管膛线、深花键孔</td></tr>
<tr><td colspan="3">固定阴极式</td><td></td><td>固定式</td><td>固定式</td><td></td><td>500
1 000
1 500</td><td>扩孔
抛光
去毛刺</td></tr>
</table>

2.2.2　机床运动系统的布局原则

机床运动系统的组成和布局影响机床的通用性、操作性、刚性和加工精度。运动坐标的数目越多，通用性就越好，且操作、调整方便。但坐标数的增加相应增加了运动接

触面和接触间隙，使接触刚性减弱，在外界载荷的作用下就会增大机床变形量，并使变形量和变形方向不稳定，甚至发生振动，这些都会影响到机床刚性、精度和稳定性。

机床运动系统的组成和布局要根据加工的具体要求而定。一般来说，在全型加工的大型机床中宜采用固定工作台，滑枕头单坐标进给的方案，以确保机床的高刚度。相应带来工件、夹具安装、调整不便的缺点可用附件弥补。打孔机床及专用性强的中小机床也是如此，通用性强的中小机床工作台（含工作箱）可做成 X、Y 双向水平移动式，但必须采取严密的防锈蚀措施和可靠的夹紧机构。立式机床的滑枕头一般布局在机床上部，加工时工件固定，工具向下进给，在必要时也可采用与此相反的布局方式。例如加工轴对称工件中需要工具电极旋转时，或用侧流式加工型腔时，均可将滑枕头置于机床下部而向上进给。前者有利于机床刚性的加强，后者有利于流场的稳定。卧式机床的滑枕一般为水平安装，但近年在叶片电解加工机床中开始采用滑枕向上倾斜30°或45°方向进给的方案以便一次全型加工出整个叶身表面。近年发展的展成法电解加工则采用多坐标数控机床。虽运动系统的接触刚性较弱，但由于极间负载小，因而仍可达到较高的加工精度。

2.2.3　总体布局对机床性能的影响

总体布局直接影响到机床的刚度、精度和操作、维护的方便。如前所述，20世纪60年代的电解加工机床甚至至今某些国内的电解加工机床在选择机床的总体布局时，往往沿用金属切削机床或电火花机床所用的形式，忽视电解加工机床的特殊性以及总体布局与电源、电解液系统之间的匹配关系，随之而带来的问题是刚性不足或规格与使用要求不符，参数不能满足工艺需要等。因而在总体布局时必须充分认识总体布局与刚度、精度和操作、维护的关系。

（1）总体布局与机床刚度、电源和电解液泵容量之间的关系

总体布局是确保机床刚度的基础。在主要结构的尺寸和选用材料相同的条件下，不同的总体布局得到的机床刚度不同。影响机床刚度的主要环节是床身－滑枕的布局。以表4.3-3中框型与C型两种总体布局为例，若将C型的结构简化为悬壁梁，将框型结构简化为简支梁（图4.3-5），则由材料力学可知C型立柱的最大变形量为

$$y = \frac{FlL^2}{3EJ} \qquad (4.3\text{-}3)$$

而框型横梁最大变形量为

$$y = \frac{FL^3}{48EJ} \qquad (4.3\text{-}4)$$

上两式中，E 为弹性模量，取决于立柱或横梁所用的材料；J 为截面惯性矩，取决于立柱或横梁的截面尺寸。

C型结构的立柱变形量与主轴的悬伸距离成正比，一般来说，$l = \frac{L}{3} \sim \frac{L}{2}$，故C型立柱变形量 $\left(y = \frac{L^3}{9EJ} \sim \frac{L^3}{6EJ}\right)$ 为框型横梁变形量 $\left(y = \frac{L^3}{48EJ}\right)$ 的5.3～8倍。由此例即可看出总体布局对机床刚性影响之大。卧式双头机床的受力与变形如图4.3-6所示，这种布局的刚性主要取决于床身，床身受力的情况与C型立柱（图4.3-5a）相似，但由于卧式机床床身可以通过地脚螺栓稳装在地基上，而且床身内部筋肋的布置比立柱方便，可以设计出较大的截面惯性矩，因而卧式机床布局的刚度比C型布局为高。

除上述机床受力后的变形量与总体布局有关外，机床在受力后的变形方向亦与总体布局有关。仍以上述结构为例，C型布局及卧式机床发生变形时，主轴将产生倾斜而框形布局只有主轴上抬，但轴线不会倾斜，卧式机床受力变形时，由于其刚性强于C型，因而其主轴倾斜量较小。

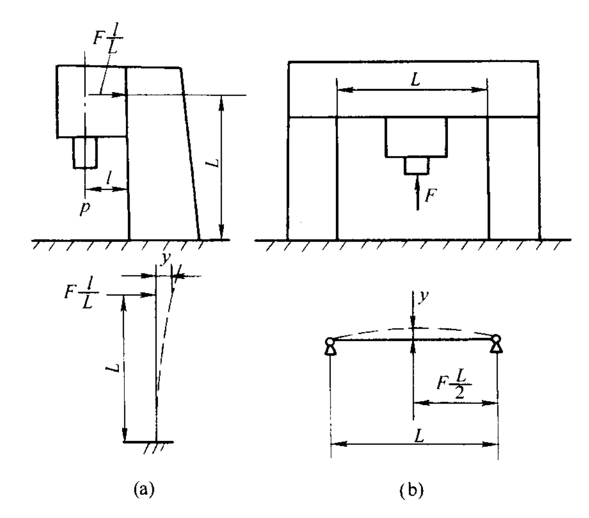


图4.3-5　C型与框型结构的简化图

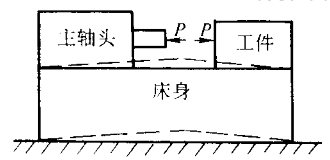


图4.3-6　卧式机床受力变形简图

其他类型的床身－滑枕的布局均是从上述三种布局演变出来的，其刚性的优劣可参考上述分析。

如上所述，不同总体布局的刚度不同，因而承载能力也就不同，因此，所匹配的电源容量和电解液泵的流量、压力也应不同。承载能力强则可加工的面积大、电流密度也可用得较高（因机床刚性强，就可选用较小的加工间隙、较高的电解液流速），就应该匹配较大容量的电源和泵，反之亦然。在表4.3-3中可明显地看出这个规律。

（2）总体布局与机床加工精度的关系

总体布局对机床加工精度的影响首先体现在机床受力变形上。如上所述，不同的总体布局，滑枕头相对工作台的受力及变形大小、变形方向不同，由此引起的加工尺寸误差和形位误差也不同。在上例中，框型床身沿滑枕轴中心线承载时，滑枕头只有上抬变形引起的加工深度误差，而且此误差可以通过滑枕头进给位置的闭环控制得到补偿。但C型床身及卧式机床承载时产生的倾斜变形除导致加工出的孔的椭圆度加大外［如图4.3-7所示孔长轴直径由 $d + 2\Delta$ 变为 $(d + 2\Delta)/\cos\theta$］，还引起孔对基面的不垂直度误差，且均无法通过控制系统纠正。在批量加工中，机床的变形量和变形方向若有变化或产生振动，则加工出的尺寸将不一致，导致重复精度下降。其次是影响到加工参数的选择：机床总体布局的刚性强则给出了采用小间隙加工（$\Delta \leqslant 0.10$ mm）或高频、窄脉冲电流、微小间隙（$\Delta \leqslant 0.05$ mm）加工的必要条件，从而有可能得到较高的加工精度。再次是对流场的影响：用立式机床加工时，

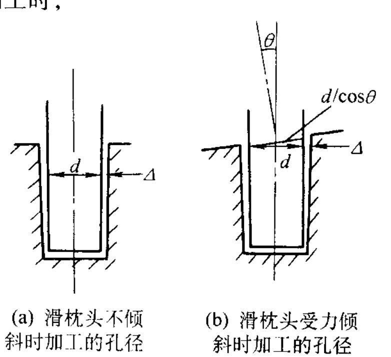


图4.3-7　变形方向与加工精度的关系



沿工件加工面四周流场分布较均匀，尤其是当混气加工时更为明显，因而有利于加工精度的提高。在轴对称工件及套料加工中上述优点亦较为突出。

(3) 总体布局与机床操作、维护的关系

由于电解加工设备的复杂性导致其操作和维护也较为复杂，又因工作环境较恶劣，因而维护工作极为重要。在总体布局时就必须考虑到如何便于操作和维护，其中心问题是电解加工工作区以及频发故障区的可达性。立式机床工作箱上部封顶，因而不能直接起吊、装卸工件及工装，特别是框型结构虽刚性好，但工作箱的两侧被床身遮挡，不能开门，这些均给工件、工具的安装、定位、调整带来不便。中小型零件加工时此问题尚不突出，但大型零件加工中则较为严重。如采用工作台移出的方案则机构过于复杂将会影响机床刚性、精度和稳定性，故一般不用此布局。大型机床可采用大工作箱，使调整手能进入其中以及增加相应的附件及调整、对刀用的二类工具是解决此问题的较好办法。卧式机床可采用可移开式工作箱罩，因而工作区可达性好，操作、安装、调整方便。

综上所述，在电解加工机床的总体布局中刚性与加工精度是一致的，但往往与操作、维护的方便有矛盾，这就需要根据具体的加工要求、加工对象的特点抓住主要矛盾，衡量主要利弊来取舍，并采取适当的补救措施。

2.3　机床主要部件的典型方案

2.3.1　床身

床身是机床的基础部件，上面安装有各种功能部件，因而要求刚性好、定位基准精度高。卧式机床床身多用箱型结构，应确保高的纵向刚性以减少受轴向载荷后的翘曲变形(图 4.3-6)。在变形最大的中段，应重点布置加强筋以增大截面惯性矩，并加地脚螺栓。大型立式机床床身由底座、立柱和上梁三部分组成。可采用加预应力的长拉杆将三部分连成一体，如图 4.3-8 所示，装配前将拉杆预热，装配后拉杆冷却收缩而受拉伸预应力，床身则受压缩预应力。这样可以防止框架承载后三部分的接触面分离，获得强的接触刚性。在 C 型床身中可以在床身开挡处加拉杆以减少受轴向力后床身立柱的弯曲变形（图 4.3-9）。

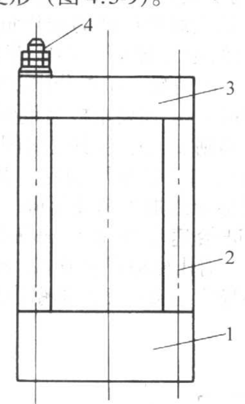


图 4.3-8　框式床身装配示意图
1—底座；2—立柱；3—横梁；4—长螺栓

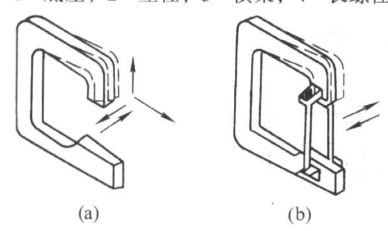


图 4.3-9　C 型床身开挡处加拉杆示意图

确保床身各安装基面间的形位公差是获得高机床精度的基础，一般应控制在 0.025 mm/300 mm 内。为加强接触刚性，床身各连接面及安装面均不应挖空。为确保机床精度的长期稳定，床身必须严格消除内应力。

国外电解加工机床床身多采用焊接结构，它可以适应电解加工机床单件生产或小批量多品种生产中结构灵活多变的需要，其刚度质量比亦较大。但床身的焊接工艺较复杂，应合理制定焊接工艺过程，并采用适当工装以控制焊接变形。可采用振动消除应力法来消除焊接内应力。焊接结构的钢基面较难刮削，可采用镜面硬质合金刮刀、振动刮削机。国内较多采用铸造结构床身，其质量较易控制，也比较容易刮削，因而较适合国内当前的制造条件。

2.3.2　滑枕头

滑枕头由滑枕体、导轨、阴极安装板三部分组成。阴极安装板用于安装、定位工具电极。导轨则用以确定工具阴极的运动轨迹。滑枕头的结构与机床的总体布局是决定机床刚性和加工精度的两大重要因素。它与进给系统又是决定工具进给平稳、速度恒定的两个关键。故其刚度、精度、灵敏度和稳定性的高低，关系到整台机床的质量和水平，因而必须足够重视其结构设计和加工质量。

图 4.3-10 的阴极安装板为双层、十字键槽结构，可在垂直、水平两个方向上微调工具的位置，其上布满安装工具电极用的螺孔。在高精度的机床中，滑枕头阴极安装板对滑枕头底部的安装定位面的形位公差应达 0.025 mm/300 mm、滑枕头导轨面形位公差应达到 0.01 mm/全长。

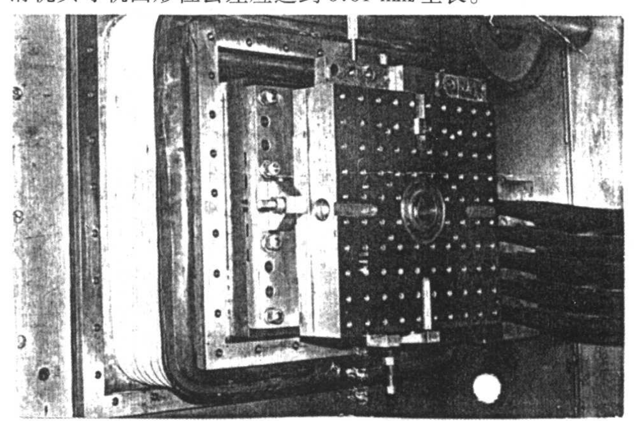


图 4.3-10　双向调整式阴极安装板

在早期的电解加工机床中滑枕头的导轨结构曾采用圆柱套筒式，现已基本淘汰。静压导轨摩擦因数小且无磨损和锈蚀问题，刚性亦属上乘，但由于结构复杂因而未能在电解机床中广泛采用，19 世纪 70 年代以来滚动体导轨在先进的电解机床设计中得到广泛应用。图 4.3-11 ~ 图 4.3-13 是适合小、中、大机床的三种布局方式。图 4.3-14 是 Anocut 公司采用的典型方案。

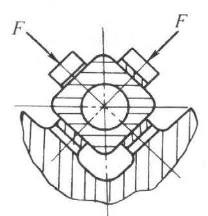


图 4.3-11　小型方滑枕横截面
F—滚动体预应力

滚动体导轨的主要优点是用预加负荷（动负荷的 20%）消除滚动导轨接触面上的间隙而仍保持滚动摩擦（摩擦因数为 0.005），因而刚性强、精度高、运动灵活、进给平稳，可

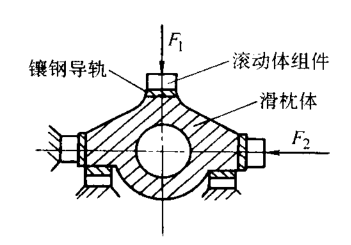


图 4.3-12 翅形滑枕横截面

F_1—正向预应力；F_2—侧向预应力

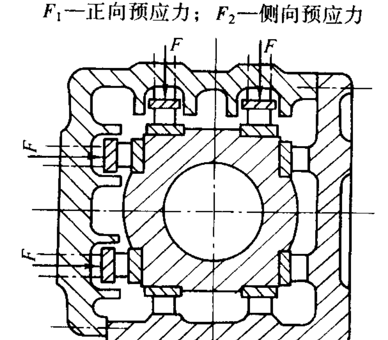


图 4.3-13 箱式滑枕截面

F—滚动体预应力

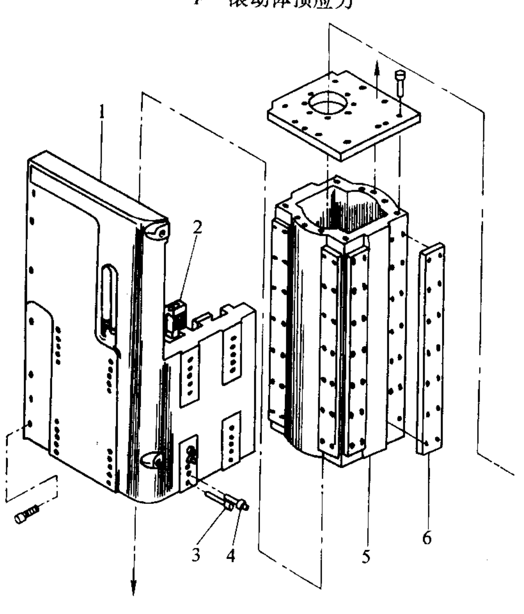
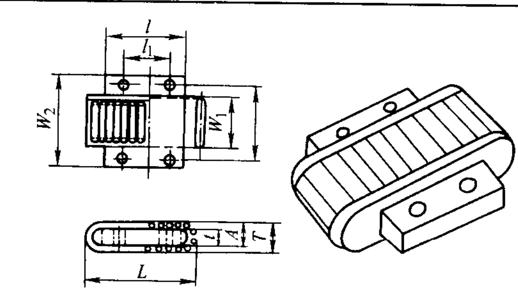


图 4.3-14 箱式滑枕解剖图

1—外方箱Γ形体；2—滚动体组件；3、4—加预应力螺栓；5—滑枕体；6—镶钢导轨

消除爬行。表 4.3-4 是两种常用滚动体的尺寸及承载能力。图 4.3-15 所示为滚动体导轨的技术要求。为确保预应力准确、均匀，应采用扭力扳手加力。

表 4.3-4 导轨滚动块尺寸及承载能力



型号	t	L	W_1	T	W_2	A	l	l_1	B	动载荷
	mm									N
2 050	8	50	20	16	36	12	30	18	29	19 500
3 270	10	70	32	20	55	15	45	27	44	46 000

随着自润滑塑料贴面导轨的材料和工艺的发展，其质量已较为稳定，经过钴 60 照射的塑料贴面板黏合能力极强，现已开始在电解机床上采用。它同样具有摩擦力小，运动灵活，支承刚性好，精度高的优点，而且耐腐蚀，制造、使用简单，是一种很有发展前途的导轨品种，近年已用于大型立式电解加工机床工作台的 X、Y 双坐标运动导轨上，并已经过较长期的生产使用的考验，证实效果良好。现又开始在滑枕头导轨上应用。

为使滑枕体有高的刚度质量比，宜采用铸钢材料，其上的镶钢导轨应采用高硬度工具钢，经精密导轨磨床磨削，达到前述精度。

2.3.3 进给系统

（1）分类

滑枕进给系统由拖动和传动两大部分组成，表 4.3-5 给出了已使用的电解加工机床进给系统的分类和特点。

（2）评定电解加工机床进给系统的两大指标

1）进给速度的变化量——工作进给的刚性 进给系统的速度特性要硬，从空载到满载的变化量应在 0.025 mm/min 以内；低速进给的稳定性要好，不能有爬行、漂移；灵敏度、分辨度要高，一般情况下位置分辨度应为 0.01 mm，速度分辨度为 0.01 mm/min。上述要求极为重要，特别是在小间隙加工中，如不能达到则加工中会引起极间火花、短路或加工表面局部结疤，导致加工过程不稳定，甚至无法进行加工。加工速度的误差还会导致加工精度下降。例如 Anocut 公司加工深孔时发现当进给速度为 8.1 mm/min 时，速度每变化 0.3 mm/min（3.7%）则孔径将产生 0.025 mm 的误差。在套料加工中进给速度不稳定还会在工件侧壁形成环形波纹或沟印。

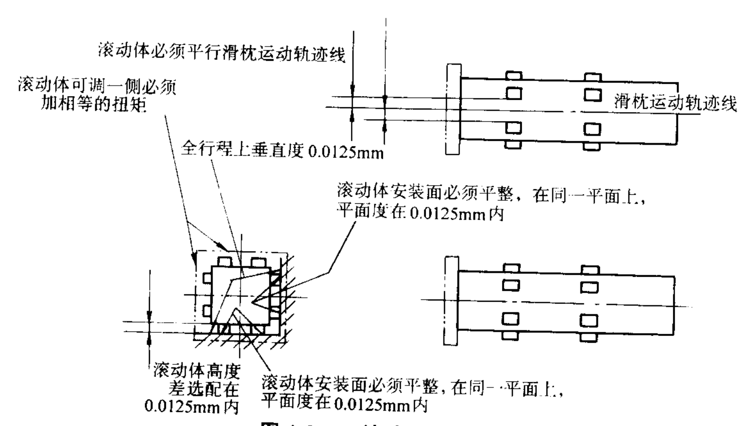


图 4.3-15 滚动体导轨的技术要求



表 4.3-5　电解加工机床进给系统分类

结构分类			
类型		特点	应用范围
液电类	油缸拖动，电液伺服位置速度闭环控制系统	1）灵敏度高 2）精度高 3）拖动力大，系统刚性好 4）调速范围宽 5）耐蚀性好，使用寿命长	1）对高精度、大推力机床推荐此方案 2）振动机床 3）近期的液压机床多采用
	油缸拖动，机液反馈，位置闭环控制系统	1）稳定性好，可靠性好 2）拖动力大，系统刚性好 3）调速范围窄，灵敏度较低 4）耐蚀性好	1）适于恒速进给专用机床 2）早期液压机床用，现已少用
机电类	交流电机拖动开环控制系统	1）电气系统较简便可靠 2）精度较低，系统刚性较差 3）减速系统复杂	1）精度要求稍低的机床用 2）早期机床用，现已少用
	直流电机拖动，可控硅调速，速度半闭环系统	1）精度较高 2）功率较小 3）减速系统复杂	1）推力较小的机床用 2）中期机电型机床用
	步进电机拖动，数字控制系统	1）精度较高 2）功率稍小 3）调速范围较宽	1）高精度中等推力机床采用 2）国内中型机床采用
	交流伺服电机拖动，半闭环系统	1）精度高，灵敏度高 2）功率稍小，但低速性能好，出力大，恒扭矩，大功率电机惯性较大 3）系统刚性较好 4）调速范围宽 5）体积小，寿命长，可靠性好	1）近期新发展 2）中、小型电解机床推荐此方案
机液混合类	快速由油缸拖动；慢速由直流伺服电机驱动油缸	1）可靠性较好 2）精度较低 3）机构较复杂，刚性较差，传动链较长	早期小型机床采用，现已不宜再用此方案

由于进给速度的变化量对电解加工的质量有重大影响，因而将之作为评定进给系统性能的首要指标。

2）调速范围　电解加工工艺要求的调速范围极宽，在大面积精加工时，加工速度可低到 0.07 mm/min，而在三面进给时送进速度则可高达 15 mm/min。另一方面在滑枕工作循环日益自动化和位置精度日益提高的前提下，为缩短辅助时间，滑枕快速趋近和返回速度往往达到 500 mm/min。调速范围关系到扩大电解加工的应用领域，因而是评定进给系统性能的另一主要指标。

(3) 电解加工机床进给系统的两类典型方案

从表 4.3-5 可以看出，当前电解加工机床进给系统基本上分为液压和机械两大类，前者较佳的方案为油缸拖动、电液伺服控制，位置、速度闭环系统，如图 4.3-16 所示。由于采取了速度闭环控制，因而此方案速度特性硬，特别是低速性能好，消除了液压系统常有的低速爬行及零位漂移。

美国 Anocut 公司研制的此系统的最高性能指标如下：

最大承载	90 kN
轴向刚性	0.006 mm/10 kN 英制 0.000 1″/1 000 lb
位置分辨度	公制系统 0.01 mm 英制系统 0.000 1″
位置精度	公制系统 ±0.01 mm 英制系统 ±0.000 1″
速度分辨度	0.025 mm/min
速度变化量	<0.025 mm/min
进给速度范围	0.025 ~ 2 500 mm/min
调速范围	1/100 000

此系统虽较为复杂，成本较高，但用于大型电解机床上可充分发挥其出力大、刚性好、灵敏度高、精度高、耐蚀性好的优点，是大型电解加工机床进给系统的较佳方案。

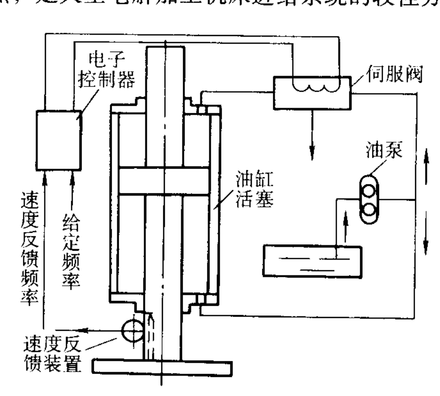


图 4.3-16　电液伺服控制进给系统方案简图

机械进给系统由电动机 - 减速器 - 滚珠丝杠、丝母副组成。其系统方案简图见图 4.3-17。在现有的电解加机床中采用较多的是直流伺服机，但近年交流伺服机发展较快，在市场上已基本取代直流伺服机，其低速性能好，例如低速下仍能输出较大扭矩，调整范围甚宽，可控性好，可以从快速直接转工作速度而无超调，这些优点正好适应电解加工进给系统的需要（详见本章第 5 节），电动机工作可靠、稳定是其突出的优点，采用此方案后，进给系统大为简化，电动机可

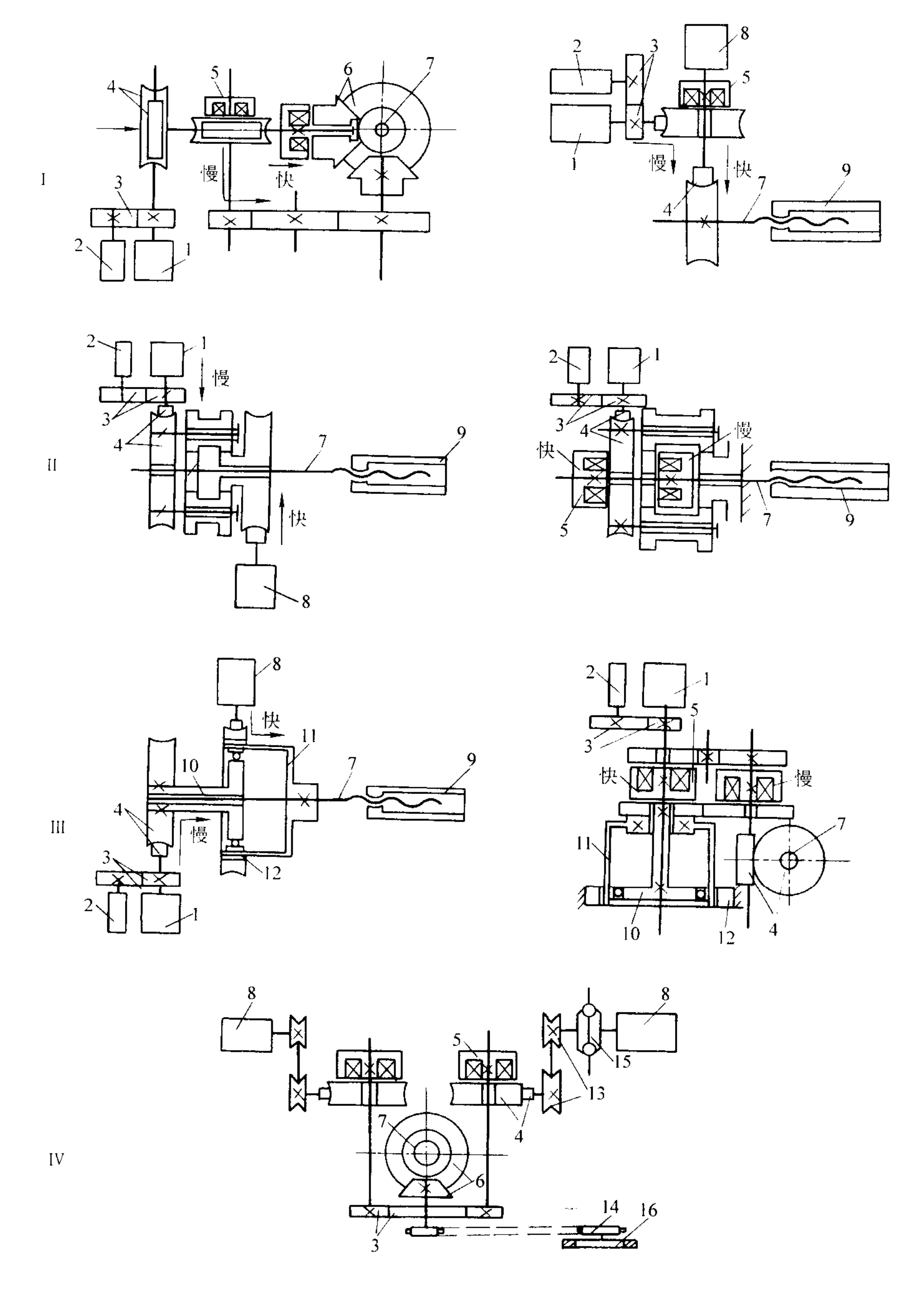


图 4.3-17　机械进给系统方案简图

Ⅰ—蜗轮蜗杆减速；Ⅱ—蜗轮蜗杆加行星减速；Ⅲ—蜗轮蜗杆加谐波减速；

Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ—均由直流电机拖动，可控硅无级变速；Ⅳ—蜗轮蜗杆减速，由交流电机机械无级变速

1—直流电机；2—测速发电机；3—齿轮副；4—蜗轮副；5—电磁离合器；6—锥齿轮；7—滚珠丝杠；8—交流电机；9—主轴；10—谐波发生器；11—柔轮；12—定轮；13—皮带轮；14—链轮；15—机械无级变速器；16—手轮（刻度盘）

直接传动滚动丝杠而无需减速器，因而也提高了恒速进给的精度。一台电动机既可完成快速进给又可完成工作进给，因而成本较低，经济性好，是中、小电解加工机床进给系统的最佳方案。

在交流伺服进给系统中由于取消了减速器，其进给刚性和传动精度主要决定于滚珠丝杠副，因而正确选用滚珠丝杠就成为设计进给系统中的重要一环。可根据进给系统要求的承载能力按表 4.3-6 选用滚珠丝杠的规格。然后根据允许的进给速度变化量及最低的工作转速算出允许的轴向间隙和螺距误差，即可从表 4.3-7 中选取丝杠的精度等级。

表 4.3-6　滚珠丝杠参数

丝杠直径/mm①	螺距/mm	滚珠直径/mm	基本载荷/N
20	5	3.175	6 050
28	6	3.175	7 150
36	8	4.762 5	13 800
45	10	6.350 0	22 300
55	12	7.143 8	22 800
70	16	3.525 0	72 200
100	20	9.525 0	86 300

① 丝杠直径是对应滚珠中心之间的直径。

表 4.3-7 NSK（日本）滚珠丝杠标准

精度等级	丝杠精度		轴向间隙/mm				
	单螺距误差/mm	螺距积累误差/mm·（300 mm）$^{-1}$	0（预压）	0.005 以下	0.02 以下	0.05 以下	0.3 以下
UUP	0.003	0.005 以下	UUPZ	UUPT	—	—	—
UP	0.003	0.01 以下	UPZ	UPT	—	—	—
SP	0.003	0.015 以下	SPZ	SPT	SPS	—	—
P	0.005	0.025 以下	PZ	PT	PS	PC	—
H	0.008	0.05 以下	—	—	HS	HC	HL

在机械传动系统中进给速度变化量主要取决于传动间隙，在交流伺服进给系统中就是滚珠丝杠与丝母之间的轴向间隙以及螺距积累误差，在低速传动中螺距的误差可忽略不计。因而这种轴向间隙的影响必须用平衡重力或预压的办法予以消除。

2.3.4 工作箱部件

工作箱是进行电解加工的场所。除定位、安装工件夹具、工具阴极以确保其准确的相对位置外，还要将电流、电解液以一定的要求引入到加工间隙区，并将电解产物及有害气体有效地排出，防止泄漏。工作箱内除工作台、阴极安装板外还布有电缆导线、输液管道、抽风管道。如何正确布局是一个重要的问题。另外防蚀和密封也是需要认真考虑的特殊要求。工作箱是电解加工机床中最集中反映电解加工设备特殊性的功能部件，因而要设计好这个部件必须按电解加工工艺的要求行事，图 4.3-18 是大型卧式单头电解加工机床的工作箱部件，它比较全面地包含了这个部件的各个主要环节，也是一种有代表性的工作箱部件的布局方式。下面就各主要环节的设计方案作一简述。

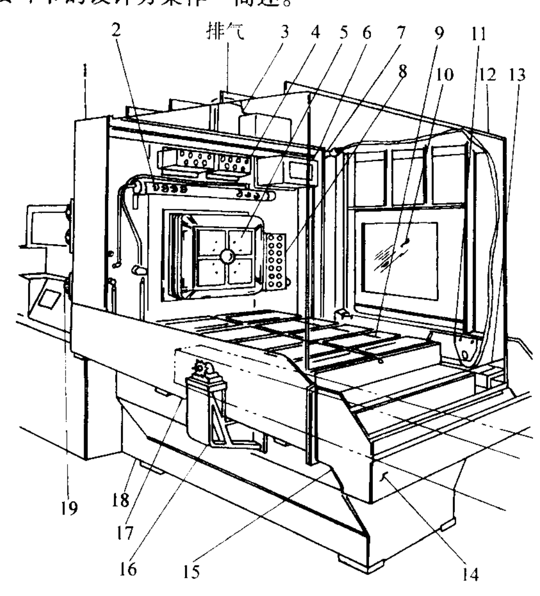


图 4.3-18 大型电解加工机床工作箱

1—Π 形框架；2—进液导管；3—抽风机；4—阴极电缆进孔；5—阴极安装板；6—抽风口；7—加强筋；8—阳极电缆进孔；9—工作台；10—观察窗；11—滚轮组件；12—活动罩；13—导轨；14—排液口；15—排液斗；16—支架；17—箱底；18—床身；19—压力表

（1）工作台

工作台分固定式和移动式，后者除台体外还有 X、Y 双向导轨。由于电解加工机床的工作台组件是直接处在腐蚀性介质及潮湿环境中，因而防蚀是设计中要考虑的特殊问题。早期的台体均采用不锈钢制成，其制造工作量大，材料昂贵，因而成本甚高。近年已为花岗石所取代。花岗石刚性好、不会吸潮变形，绝缘强度高，易于达到高精度，其平面度及各基准面间的平行度和垂直度可达到 0.01 mm 以内，是较佳的工作台材料。花岗石较脆，虽抗压能力强，但抗弯、抗振能力差，因而外廓尺寸应具有较大的厚度面积比。安装的底平面（含床身上的安装基面），不宜挖空。在要求有螺纹孔、定位销孔或开槽处，均应嵌镶预先加工好螺纹孔、销孔或 T 形槽的不锈钢块，用环氧树脂黏结固定。工作台的导轨采用塑料贴面是较佳的方案（详见本章 2.3.2 节）。工作台则采用静压导轨（图 4.3-27），效果亦好，但结构较复杂，成本较高。

（2）工作箱罩

工作箱罩用于防止电解液及潮气的逸出。它分为固定式及活动式两种类型，前者在其箱壁上开门，作为安装、调整之用，后者则可移出工作区，便于安装、调整，如图 4.3-18 所示。

工作箱罩有下列三种构成。

1）玻璃钢板拼装式（图 4.3-22） 此法的优点是制造简便，但箱罩较为笨重，工作温度高时易变形、泄漏，只适于小型设备。

2）不锈钢板焊接式（图 4.3-18） 这种形式的优点是易于布局，较轻便，但制造工艺较复杂，成本高，长时间使用后焊缝处仍有电化学腐蚀，为减轻此腐蚀，在清理焊缝时不得采用铜刷而必须采用与基体相同材料的刷子。可采用阴极保护箱罩及金属管道，但此法会造成工作箱内杂散电流对箱内金属件特别是带阳电零件的杂散腐蚀。此种结构较适用于大型电解机床。

3）整体玻璃钢薄壳式 这种结构的制造过程是在木模上用环氧树脂逐层涂覆、黏结玻璃丝布，待其固化成型后将模芯取出。制作过程可以根据结构的需要嵌镶安装边、螺栓及电缆接头、管接头等金属构件。其优点是轻便、省料、耐蚀及密封性能好。但制造工艺过程较复杂，必须严格按工艺要求运作，否则难于确保质量，其次是结构刚性稍弱，适用于中型工作箱。

工作箱罩固定部分与各活动部分之间必须可靠密封。最重要的密封部位是滑枕伸入工作箱的窗口处，常用加强的橡胶摺叠式密封，以杜绝电解液或潮气泄出及进入滑枕箱。箱门用橡胶密封条压紧密封（图 4.3-19）。活动罩与固定箱壁之间也可用迷宫密封，但只能防电解液泄出而不能防气体逸出。移动式工作台的侧壁与工作箱底部开口处也应密封，可在其周围构成迷宫槽，其中充油，但此法只适于小行程的工作台。

（3）输液管道

工作箱内输液通道的设置有两种形式，对小型工件可以直接在夹具上安装电解液通道，外接输入管；大型工件则必须在箱内安装歧管，其主管道外接进液管，分支软管则通过快速接头接到分水器上，再经夹具内的通道进入加工间隙区（图 4.3-18）。

2.3.5 导电装置

电解加工机床的导电系统在传导大电流时不应过热，线路压降应小。在传导脉冲电流时还应考虑波形畸变及衰减问

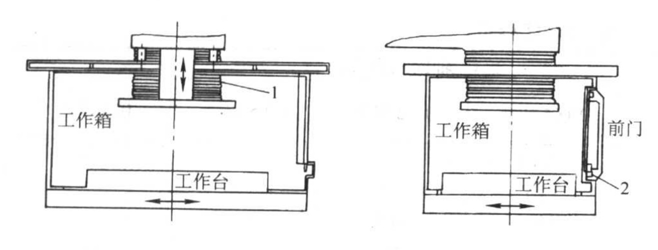
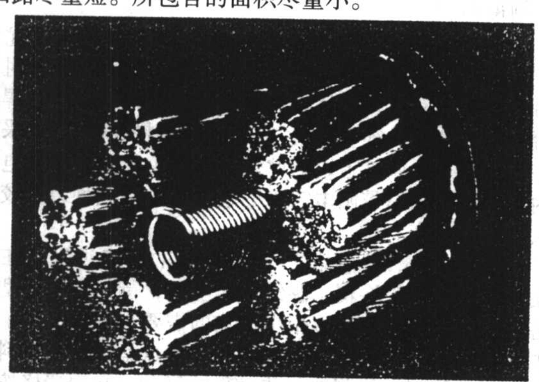


图 4.3-19 工作箱的密封方式
1—橡胶摺叠式密封；2—橡胶条压紧密封

题，应确保波形的失真最小。导电装置还应抗腐蚀，对阳极回路由于存在电化学杂散腐蚀，因而此问题尤为重要。

传导直流电时，引起发热和线路压降的因素是线路电阻，其中接触电阻影响最大。应尽量选择电阻小的导电材料，常用的有紫钢、黄铜和不锈钢，紫铜的电阻最小，黄铜次之，为紫铜的 4 倍，不锈钢电阻最大，为紫铜的 40 倍。其次在计算导电元件的截面积时应正确选用电流密度，紫铜以 160 A/cm^2 为宜，黄铜只能通过 40 A/cm^2，不锈钢则为 4 A/cm^2。如果导电件通有冷却水则选取的电流密度可比上述值高得多。例如空心冷却电缆（图 4.3-20）选用的电流密度可比普通电缆高 4～5 倍。为减少接触面发热也可在导电块内通冷却水。为减小接触电阻，导电件的接触面必须磨平整、光滑，如能镀银或烫锡则更好，并要牢固地用螺钉拧在一起。还应确保接点不与电解液接触。一旦接触面被腐蚀，其接触电阻将进一步加大，发热和压降亦将加剧。引起脉冲电流传输失真和衰减的主要因素是回路寄生电感。因而必须确保此电感值最小。应采用低电感传输线。在线路布局时应使回路尽量短。所包含的面积尽量小。


图 4.3-20 空心水冷电缆

工作箱内的导电方式与上述诸问题也有较大关系，而且还影响操作性能。应根据工件大小、形状和加工的批量正确选用箱内的导电方案。常用的方案有两种：一是将电缆线引入，用导电接头直接接到工件阳极及工具阴极；二是在工作箱外将电源线接到滑枕体及不锈钢工作台，电流通过阴极安装板及工作台传导到阴极和阳极。前者线路损失小，且因工作台、夹具均不带电，可以采用耐蚀的非金属材料，如采用金属材料对不带电的零件则可加以阴极保护，防止电化学杂散电流腐蚀（夹具中与工件接触的定位，夹紧件必须采用非金属材料）。但此方案的缺点是工作箱内导线较多，走线较复杂，布局欠佳，每次装卸工件时还要拆卸导电接头，并要防止正、负极导电接头相碰或正极导电接头与工作箱相碰而引起送电时短路。

2.4 两类常用电解加工机床简介

如前所述叶片是电解加工工艺应用面最广的领域。其加工难度高，技术复杂，品种多、批量大，因而叶片电解加工机床在专用电解加工机床中占的比例最大，采用的先进技术最多。叶片电解加工机床的水平反映了电解加工机床的整体水平。立式电解加工机床的加工范围宽、加工品种多，例如打孔、整体叶轮套料、模具型腔加工、大型叶片型面加工等，因而立式电解加工机床是另一类应用面较广的通用电解加工机床。这里重点介绍这两类机床。

2.4.1 叶片电解加工机床

（1）叶片电解加工机床的分类

叶片电解机床的分类见表 4.3-8 所列。

表 4.3-8 叶片电解机床的分类

分 类	项 目	应 用 范 围
机床形式	卧式：水平进给；倾斜进给	普遍采用
	立式	加工特大尺寸叶片
滑枕头数	单头	加工特大尺寸叶片
	双头	普遍采用
	三头	同时加工型面和凸台端面，少量应用，现已为双头卧式倾斜进给取代
容量/A	2 000	加工小型叶片
	6 000	加工中型叶片
	10 000	加工大型叶片
	20 000	

国内当前批生产使用的叶片电解加工机床有两种类型，一类是 DJS 系列，采用液电伺服控制，位置、速度闭环系统。它的样机是 20 世纪 80 年代中期北京航空工艺研究所与美国 Anocut 公司合作研制的 DJS-20 大型叶片电解加工机床（图 4.3-3，图 4.3-21）。该机床经双方联合鉴定，其性能指标达到美国出厂标准。现已投入生产使用多年，效果良好，并已系列化（表 4.3-9）、国产化，全面投入生产使用。另一种类型是中国航空工业部沈阳黎明机械厂与苏州长风机械厂于 20 世纪 70 年代合作研制、有自主知识产权的 DJ 系列电解机床，其工作进给采用直流伺服电机进给系统，快速进给采用液压系统（图 4.3-22），该系列机床在航空工厂得到较广泛的应用。

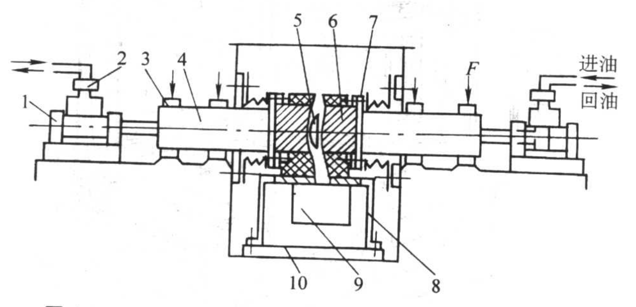


图 4.3-21 DJS-20 型机床工作部位及液压进给系统示意图
1—油缸；2—电液伺服阀；3—滚动体组件；4—滑枕头；5—叶片；6—电极；7—阴极安装板；8—升高台；9—集水器或气液混合器；10—工作台

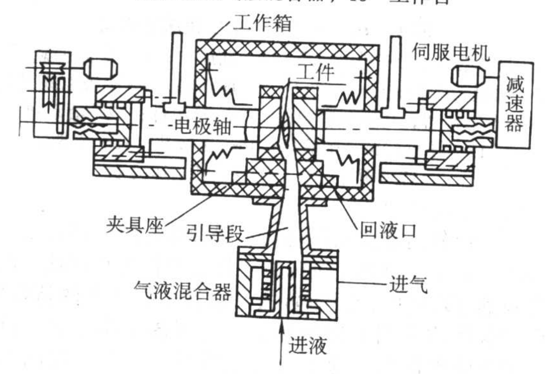


图 4.3-22 DJ-3 型机床工作部位及进给系统示意图



表 4.3-9　国内已定型的叶片电解机床的性能规格

项目	内　容	DJ-3 型①	DJS-06 型②	DJS-10②	DJS-20 型②
设备规格	额定电流/A	2×2 000	2×3 000	2×5 000	2×10 000
	额定电压/V	6～18	6～20	6～20	6～20
	工作箱尺寸（长×宽×高）/mm	620×460×370	600×750×525	800×1 040×900	1 300×1 000×1 300
	阴极安装板（长×宽）/mm	110×110	210×210	300×240	500×350
	工作台尺寸（长×宽）/mm	500×320	500×320	500×320	500×800
	中心高/mm	135	150	200	500
	阴极安装板距离/mm	250～360	100～340	240～540	340～690
	行程/mm	快速：55，工作：50	120	150	175
	快进速度/mm·min⁻¹	300	400	400	600
	工作速度/mm·min⁻¹	0.25～0.9	0.15～25	0.15～25	0.15～25
	滑枕头最大承载/N		1.2×10^4	2×10^4	5×10^4
	位置数显分辨度/mm	无	0.01	0.01	0.01
	速度数显分辨度/mm·min⁻¹	无	0.01	0.01	0.01
	初始间隙给定范围/mm	无此功能	任选	任选	任选
	电解液泵流量/L·min⁻¹	用户自选	416	666	750
	电解液泵压力/MPa	用户自选	0.6	1	1.4
机床精度	阴极安装板对工作台形位精度/mm		0.05/120	0.03/150	<0.015
	额定负载下阴极板轴向位移/mm		0.1/6 kN	0.1/20 kN	0.04/50 kN
	滑枕头位置重复精度/mm		±0.01	±0.01	±0.01
	滑枕头速度重复精度/mm·min⁻¹		0.01（低速）0.025	0.01（低速）0.025	0.01（低速）0.025
	空载—满载速度变化量/%		1	1	1
	滑枕头爬行及零位漂移/mm		<0.01	<0.01	<0.01
	双头同步精度/mm		<0.01	<0.01	<0.01
	干、湿自动对刀精度/mm	无	±0.01	±0.01	±0.01
	初始间隙重复精度/mm	无	0.03	0.03	0.03
配套系统精度	电解液恒温精度/℃	无			±0.05
	电解液恒压精度/%	无			±2.5
	电源稳定精度/%	用户自选电源			±1.5
	快速短路保护切断时间/μs	无			8

① 数据来源：苏州长风机械厂。
② 数据来源：北京航空工艺研究所。

现正对其进行技术改造。此两类机床的规格、性能见表 4.3-9 所列。

（2）DJS 系列电解加工机床的技术特点

DJS 系列机床比较集中地采用了 20 世纪 80 年代国内外已成熟应用的电解加工设备的新技术，这些技术至今仍在成功地沿用，其主要内容见表 4.3-10 所列。

表 4.3-10　DJS-20 机床的技术特点

分类	项　　目	应　用　效　果
自动控制系统	数字控制位置、速度闭环控制系统	保证了位置精度高和速度特性硬，已经大批量生产考验
	电解液压力下自动对刀，按给定值自动定初始间隙	保证了小而恒定的初始间隙，已经大批量生产考验
	电解液恒温系统	保证平衡间隙恒定，已经批量生产考验
	电动恒压控制系统	保证流速及机械系统变形接近恒值
	电－气截止阀自动通、断电解液	连续生产中不停泵，已经批量生产考验
	双头快速短路保护装置	短路信号采样装置已在生产中使用，效果良好。短路电流快速截止装置在国内现场使用尚不稳定



续表 4.3-10

分类	项目	应用效果
机械结构	厚壁方箱滑枕、淬硬磨削镶钢导轨—加预应力的滚动体导轨副	确保了滑枕头的高刚度、高运动灵敏度，已经过现场大批量生产考验
	大容积，不锈板工作箱、Γ形门	1）调整、使用方便 2）耐蚀性好，经现场长期使用在焊缝及未接阴极保护处仍有杂散电流腐蚀
	花岗石工作台	经大批量生产使用考验，刚性好，精度高，耐蚀，绝缘可靠
	空心水冷大电流密封电缆	1）解决了大电流电缆发热及腐蚀问题 2）电流密度可达 10 A/mm² 以上，故电缆根数大为减少
	不锈钢快换接头	调整使用方便，耐蚀
	主轴箱、控制柜、电源柜等全密封结构	解决这些关键部件、系统的腐蚀问题，对发热量大的电源采用简易空调解决了密封后的凝露问题 采用密封柜的前提必须是柜内部件性能稳定，不需经常调整维修

DJS 系列机床可进行单面加工、双面同步加工或余量大的一面先加工，待两面余量相等时自动转换成双面同步加工，这样可以适合多种类型的加工需要，其单面的加工过程如图 4.3-23 所示。

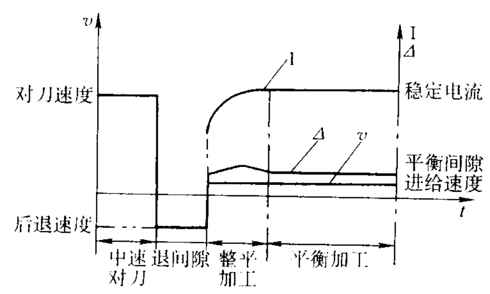


图 4.3-23　DJS 系列机床加工过程参数变化曲线

（3）英国 R.R. 公司叶片自动生产线的电解加工机床的特点

英国 R.R. 公司 1984 年投产使用了一条叶片自动生产线，其中叶身全部型面（含端面）用一台 360°电解加工机床（又称 360°ECM）一次加工完成（图 4.3-24）。这是当今国外生产现场实际使用的最先进的叶片电解加工机床之一。其技术特点如下。

1）滑枕头向上倾斜 30°进给，以便同时加工出叶身型面和端面。

2）加工过程全部由计算机控制，整条生产线用一台分布式逻辑控制器管理四台计算机，它们分别控制单台设备的加工过程及机械手传输工件的过程。

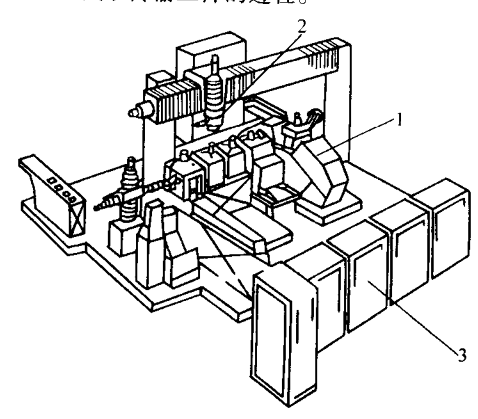


图 4.3-24　R.R. 公司叶片自动生产线

1—360°电解加工机床；2—机械手；3—计算机群

3）电解机床用的计算机控制电解液污浊度，采用火花信号反馈方案，小火花反馈到净化器，大火花则停车处理。计算机还控制电解液温度、压力和流量。

4）加工过程计算机监测刚加工完的叶片的弦长和厚度，当正在加工的叶片进行到 1/3 时段时，即得到上一片的测量结果，同时将数据反馈到机床控制系统，根据此数据适时地调整正加工的叶片的加工参数，以确保本叶片加工尺寸处在公差带中段。

此条生产线投产后获得显著经济效益，从每周一上午连续工作到周五下午。加工 6 种叶片，每种叶片更换时，调整时间仅 6 h。生产准备时间减少到原有的单机加工的 1/10，成本降低到 50%。

2.4.2　立式单头电解加工机床

立式单头电解加工机床的分类见表 4.3-11 所列。

表 4.3-11　立式电解加工机床分类

分类		特点	应用范围
机床形式		框型（图 4.3-25）	大型零件加工
		C 型（图 4.3-26）	中、小型零件加工
运动方式	滑枕头	单坐标垂直进给	通　用
		阴极工具头旋转	孔加工，轴对称型腔加工
		自上向下进给	通　用
		自下向上进给	特殊需要
	工作台	固定式	中、小型孔，模具型腔，整体叶轮
		X、Y 双向移动式	大型模具型腔加工
容量/A		1 000	孔加工，叶轮加工
		3 000	小型模具
		7 500	中型模具
		10 000 15 000 20 000 40 000（图 4.3-25）	大型模具、叶片、叶轮、花键

国外立式电解加工机床已商品化、系列化，目前生产中应用较广的为美国 Anocut 公司及德国 AEG 公司（图 4.3-25）（图 4.3-27）所生产的机床，其稳定性、可靠性、精度、自动化程度、配套性均属上乘，可以较好地满足生产的需要，但价格高昂。

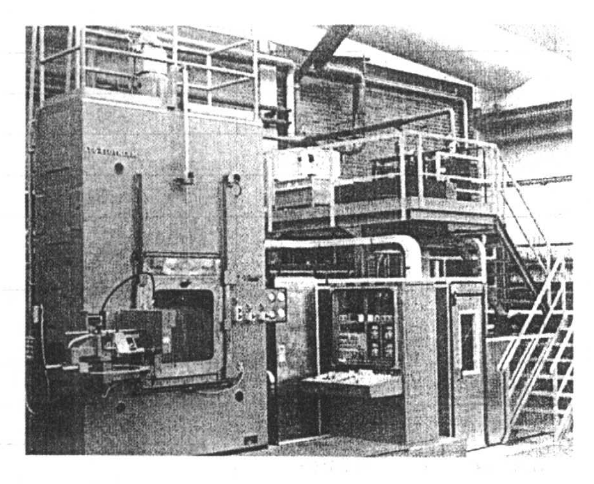


图 4.3-25 AEG 40000A 立式电解加工机床

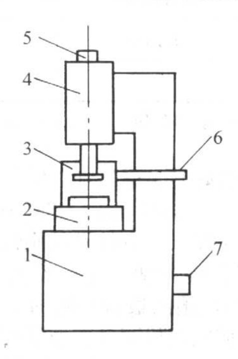


图 4.3-26 C 型立式电解加工机床示意图

1—床身；2—工作台；3—工作箱；4—滑枕箱；5—进给系统；6—传液管道；7—导电系统

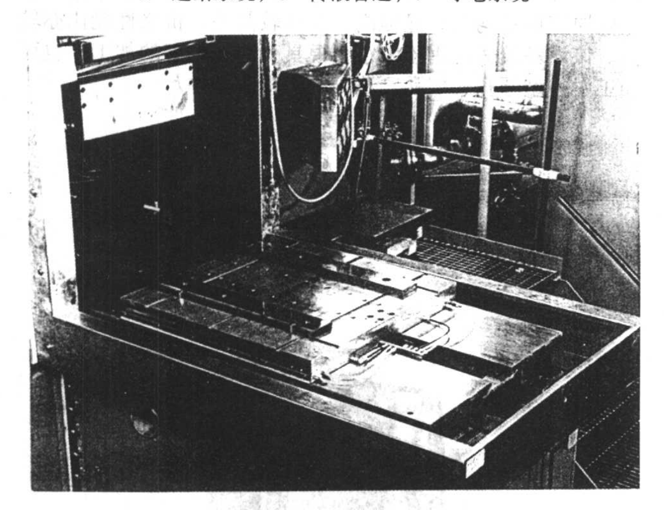


图 4.3-27 AEG 立式电解加工机床的静压导轨移动式工作台

国内亦自行研制了多种立式单头电解加工机床，表 4.3-12 列举了 19 世纪 80 年代我国自行研制的、经部级鉴定并已投产使用的此类机床，其中 DJL-20 型大型立式电解加工机床为 19 世纪 80 年代末期研制成功（图 4.3-28）。该机床大量采用了在 DJS-20 型大型叶片电解机床研制中引进的国外电解加工先进技术，并根据立式机床的特点又有所发展。例如采用了加预应力的长拉杆将床身框架的三部分连成一体，获得了高刚度。工作台 *X*、*Y* 运动系统采用了经钴 60 照射处理的塑料贴面自润滑导轨及充油的迷宫密封装置，从而解决了我国电解加工立式机床长期存在的工作台 *X*、*Y* 运动系统锈死而无法使用的难题。该机床在张家口煤机厂投产后，连续大负荷使用了近十年，效果良好，获得了较大的技术、经济效益，成为该厂大型链轮和花键轴生产的支柱设备（图 4.3-29）。20 世纪 90 年代北京航空工艺研究所在上述机床的基础上将之国产化和系列化，在保持原型机技术水平的基础上较大幅度地降低了成本。系列化机床见表 4.3-13 所列。

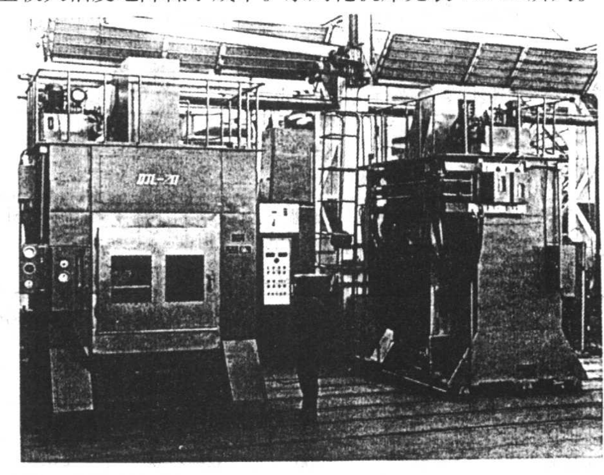


图 4.3-28 DJL-20 型大型立式电解加工机床

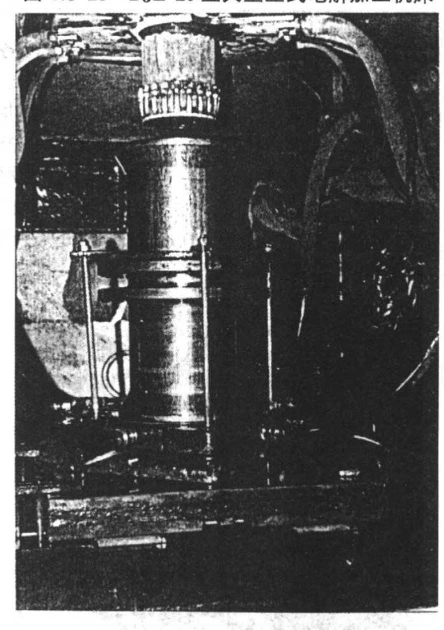


图 4.3-29 DJL-20 型机床电解加工大型煤机链轮和花键轴

表 4.3-12 国内几种立式电解加工机床规格

项 目	DJZ 型①	DX3150 型②	D3565ZY 型③	DJL-20 型④	DLZ-02M⑤
最大加工电流/A	2 000⑥/3 000⑦	5 000⑦	10 000⑦	20 000⑦	2 500（峰值）⑥/2 000⑦
滑枕头承载/N			25 000	100 000	
工作箱尺寸（长×宽×高）/mm		1 200×900×900		2 000×1 500×1 850	800×600×600
工作台尺寸（长×宽）/mm	400×300	750×500	850×650	1 000×900	400×320
阴极安装板尺寸（长×宽）/mm	260×200	500×400		650×650	200×180



续表 4.3-12

项　目	DJZ 型①	DX3150 型②	D3565ZY 型③	DJL-20 型④	DLZ-02M⑤
最大开启高度/mm	550	700	500	1 000/1 300	480
滑枕行程/mm	150	300	280	400	200 或 300
工作台左右调节行程/mm			±75	±25	±5
工作台前后调节行程/mm			前 1 200 后 120	主工作台 ±25 副工作台 ±150	±5
进给速度/mm·min^{-1}	0.05～300	0.01～10 快速 250	0.12～12	工作：0.2～25 快速：400	
滑枕头位置精度/mm	±0.01		±0.01	±0.01	±0.01
恒速精度/mm·min^{-1}	±0.01		5%	±0.01	
工作台对滑枕进给方向垂直度/mm·mm^{-1}			0.03/300	0.03/400	
工作台对阴极安装板平行度/mm·mm^{-1}	±0.01		0.04/400	0.035/500	
滑枕头轴向变形量/mm·kN^{-1}			0.18/25	0.10/90	
气液混合比自动控制精度/%			$Z_0=2\sim5$ 时≤5		

①北京航空工艺研究所；②合肥工业大学；③洛阳第一拖拉机厂，南京航空航天大学；④张家口煤机厂，北京航空工艺研究所；⑤北京航空工艺研究所；⑥配脉冲电源；⑦配直流电源。

表 4.3-13　DJL 系列立式电解加工机床

型　号	可输入最大电流/A	最大行程/mm	工作台尺寸（长×宽）/mm	位置重复精度/mm
DJL-20	20 000	400	1 000×900	±0.01
DJL-10	10 000	300	800×500	±0.01
DJL-05	5 000	200	600×400	±0.01
DJL-03	3 000	100	500×320	±0.01

其他机床也都成功地采用了若干先进技术，各有特色，能从不同方面满足不同的使用需求。例如 DJZ 型机床是我国第一台低频、宽脉冲、方波电源、振动进给的电解加工设备，其频率为 5～20 Hz，最窄脉宽 10 ms，全振幅为 0.25 mm，采用电液伺服位置闭环控制系统（图 4.3-30）。这台设备能较好地满足小型型腔、套料、深孔等加工的需要，其加工精度较传统的直流电解加工有所提高。D3565ZY 型机床带有微机控制混气比系统，能较好满足混气加工锻模的需要，加工联杆锻模的重复精度可达 ±0.05 mm。DX3150 型机床结构紧凑，床身采用四立柱式布局，既有较好的刚性又有较好的工作区的可达性，操作调整较方便。此台设备造价亦较低。DJL-02M 是 20 世纪 90 年代国内最新研制的中小型精密电解加工设备。采用了交流伺服电机驱动、数字控制系统等先进技术（图 4.3-31）。可配置各种直流、脉冲电源。该设备是在原有电解加工机床的基础上，针对模具生产所遇到的一些特殊问题而开发、研制的。其加工精度、表面质量以及工作的可靠性较原有设备均有明显提高。操作较简便，价格性能比亦较低。该设备较适合用于中小型模具型腔、刻字的加工，也可加工中小型圆孔、型孔、花键、齿轮等零件。

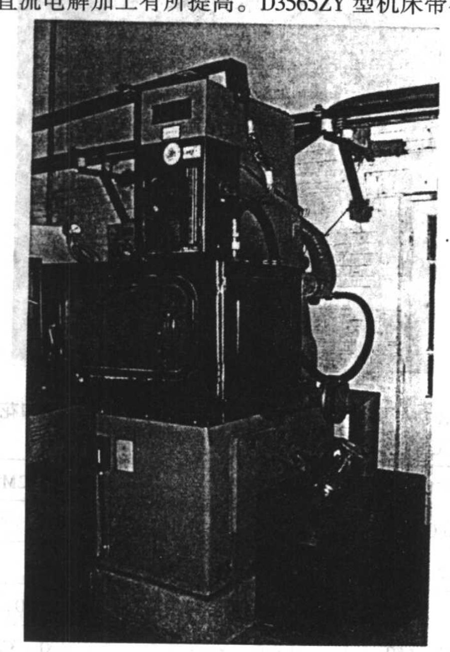


图 4.3-30　DJZ 型脉冲电流振动进给电解加工机床

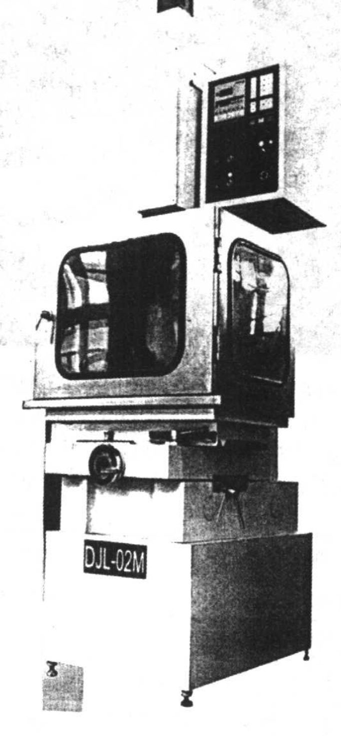


图 4.3-31　DJL－02M 精密电解加工机床



3 电解液系统

3.1 电解液系统的功能及其特点

电解液系统的功能包括供液、净化和三废处理三个主要方面。首先是将储存的配置好的电解液以给定的压力、流量供给加工间隙区，同时保持电解液的温度、浓度、pH值相对稳定；其次是在加工过程中不断净化电解液，去除金属和非金属夹杂物以防止极间短路，粗滤网孔尺寸为100 μm，精滤为25 μm。同时还应保持金属氢氧化物的含量小于5%，在微小间隙精加工时最好保持小于1%，这样既可以防止电解液的黏度过大而影响流动的均匀性，还可防止电解产物黏滞在加工表面造成“结疤”/钝化现象；再次是对污浊电解液进行三废处理，去除在某些加工条件下产生的 Cr^{6+} 及 NO_2^- 离子，并将废液浓缩成干渣以便于处理。由此可见，电解液系统是维持电解加工稳定、正常进行加工的重要手段。虽然此系统的精度要求并不十分高，但由于此系统直接接触腐蚀介质，因而确保其耐蚀性是电解加工设备能稳定工作的必要条件。电解液系统的密封性也极为重要，只有严格密封才能确保各部件如电解液泵、过滤器等正常工作，达到设计指标，并杜绝对工作环境的污染，确保文明生产的条件。国外的电解液系统一般比较完善，但价格高昂，其成本在整套设备中占的比例相当大，例如AEG公司的电解液系统的成本占全套设备的30%以上。国内的则较为简陋，往往不配套，是生产现场中电解加工设备故障率最高的薄弱环节。此外其规格性能也未能如总体布局中所要求的与机床、电源正确匹配，造成整套设备不能充分发挥其最佳状态，因而未能获得最佳的加工效果。电解液系统是国内电解加工设备中亟待改进、提高的环节。

3.2 两种典型的电解液系统

3.2.1 德国AEG公司配置的电解液系统

如图4.3-32所示，德国AEG公司电解加工设备的电解液系统，是迄今所见的设备生产厂提供的最完整的系统。其特点是参数自动控制的内容较齐全，包括了一般系统不具备的电解液浓度及pH值的自动控制。此外三废处理装置也较为完善，包括了 Cr^{6+} 还原和 NO_2^- 还原装置，使排出的废渣符合欧洲各国的反污染法。较好地解决了电解加工的环境污染问题。

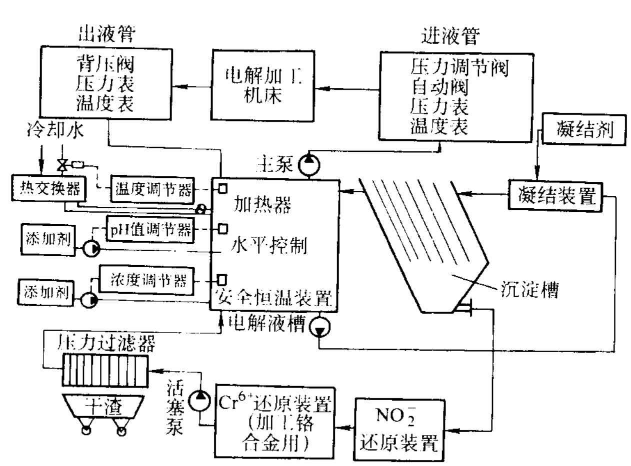


图4.3-32 AEG公司电解液系统简图

3.2.2 英国R.R.公司电解液系统的布局

图4.3-33所示为英国R.R.公司机匣电解车间一台设备的电解液系统的布置情况。这是迄今所见的电解生产车间中最完整装备的典型。整个系统的流程包括电解液的传输、污浊液的净化和处理均全部自动化。例如图4.3-33槽6中存储的经离心机浓缩的半流体状的电解泥浆的液面升到一定的高度时，受这个水位控制的浮球继电器即吸合，启动螺旋泵，将槽6中的泥浆打到另一集中存储槽中，当集中存储槽中的泥浆的液面又升到一定高度后，此槽的浮球继电器又动作，启动总的螺旋泥浆泵，将集中存储的泥浆打入板框压滤机中，压成干渣，至此就完成了污物处理全过程。该车间各台机床的电解液系统均布置在一个单独隔离开的电解液间内与机床相对应的位置上（见图4.3-34），此电解液间低于机床工作间以便各台电解机床工作箱的回液自动流入相应的电解液槽中。电解液间的地面向某一角倾斜，在此角处有一低于其地面的存液槽，电解液系统漏出的电解液或冲洗地面的脏水均自动流入此槽中，当此槽中的脏液液面升至一定高度后，其浮球继电器也吸合，启动相应的传输泵，将脏液打回到集中的存储槽中。这样，此系统只排放干渣而不排放废液。车间有完善的排气系统，工作箱内的潮气经潮气分离器处理后再排出。由于对三废进行了严密的处理，确保了车间文明、卫生的工作条件，从另一方面较好地解决了电解加工可能造成的环境污染问题。

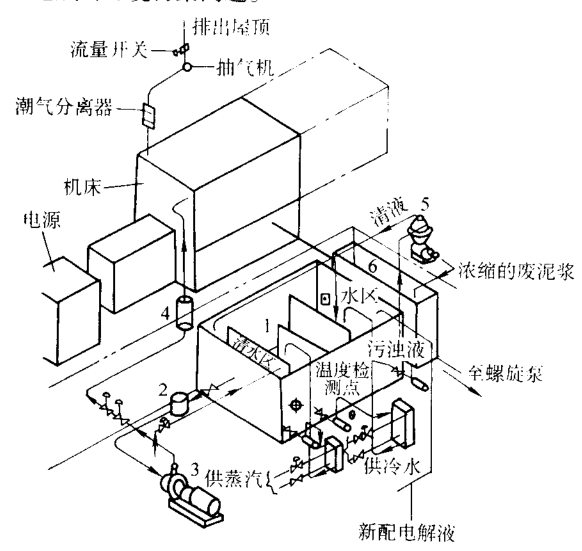


图4.3-33 R.R.公司 1×10^4 A机床电解液系统布局示意图
1—电解液槽；2—粗过滤器；3—电解液泵；
4—精过滤器；5—离心机；6—电解泥浆槽

3.3 电解液系统各部件的选用原则

3.3.1 主泵

电解液系统的电解液泵是该系统的心脏，它决定了整个电解液系统的基本性能，其选型至关重要。主泵的类型及应用状况见表4.3-14所列。

从表4.3-14可看出，离心泵的特性适合于电解加工型面、型腔的需要，已成为国内外电解加工的主要泵型，离心泵的特性曲线示于图4.3-35。要求压力偏高的可采用不锈钢离心泵，压力偏低的（$p\leq0.4$ MPa）可选用玻璃钢离心泵。对于小孔、套料、小型模具型腔的电解加工则需要较小流量和较高压力的泵型，多级离心泵、旋涡泵、柱塞泵较为适用，但国内均尚无能耐蚀的此类泵的定型产品，是亟待解决的问题。

3.3.2 电解液槽

在车间生产批量较大、电解加工机床较多且容量较大时，一般均设有隔离的电解液间，其电解液槽可作为厂房固定设施由用户统一安排，此时可建立容量较大的池式槽，例如美国G.E.公司电解车间的“游泳池”式电解液槽容量高达608 m³。对小批量多品种生产的单台电解加工设备，其电解液槽则可作为设备的附件由设备生产厂统一配置、采用移动的箱式槽。这两种类型的电解液槽的具体特点和结构见表4.3-15所列。

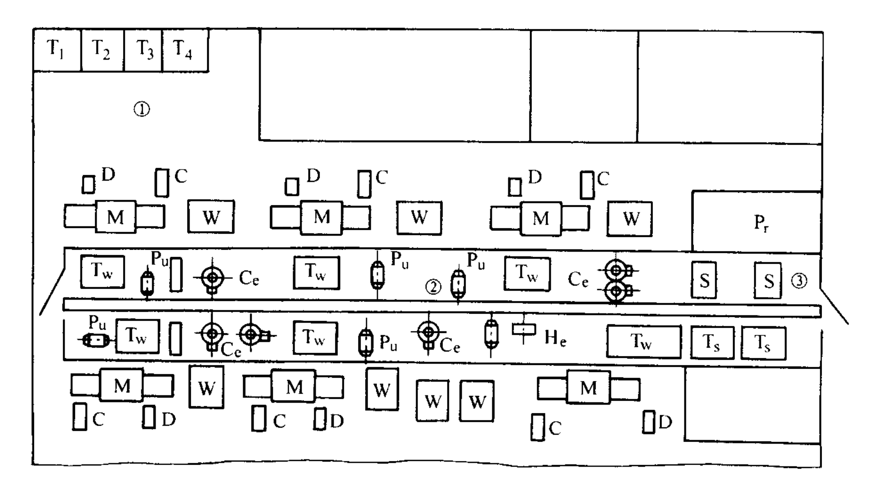


图 4.3-34 R.R. 公司电解液间的布局示意图

①—机床间；②—电解液间；③—架空桥；T_1—冷水槽；T_2—NaOH 溶液槽；T_3—热水槽；T_4—热油槽；T_s—储存槽；T_w—电解液槽；C_e—离心机；H_e—热交换器；S—泥浆液槽；M—电解机床；W—电源；C—控制柜；D—工作台；P_r—板框压滤机；P_u—电解液泵

表 4.3-14 电解液泵类型

序号	类型	特点	应用状况
1	单级离心泵	1）流量较大，压力较低，国产不锈钢单级离心泵最高压力为 1 MPa，国外可达 1.5 MPa 2）特性曲线（参见图 4.3-35） 3）使用维修较简便，工作稳定、可靠	多用于型面、型腔类加工，例如叶片、机匣、模具等；使用效果好，建议采用
2	多级离心泵	1）流量较大，压力随级数增加而提高，可以根据加工要求配置级数 2）维修较单级泵复杂 3）国内耐蚀的多级泵尚无定型产品且质量波动较大	英国 R.R. 公司为减少叶片电解加工短路机率，从单级泵改用多级泵，压力从 1.4 MPa 提高到 2.1 MPa，效果显著，国内较少采用
3	旋涡泵	1）流量较大，压力较高 2）泵效率较低，外廓尺寸较大 3）铸铁件不耐蚀，不锈钢件则成本较高	仅少数厂家使用
4	柱塞泵	1）流量较小，压力高 2）结构较复杂，精度要求较高	适于小孔、套料加工，但国内尚无定型的耐蚀柱塞泵产品，故还未推广
5	齿轮泵	1）流量较小，三齿轮泵则稍大，压力较高 2）由于电解液的腐蚀性且含泥渣，而造成齿轮工作面及端面磨损 3）维修较困难，维修频度大	国内早期使用，现除打小孔外已逐渐淘汰

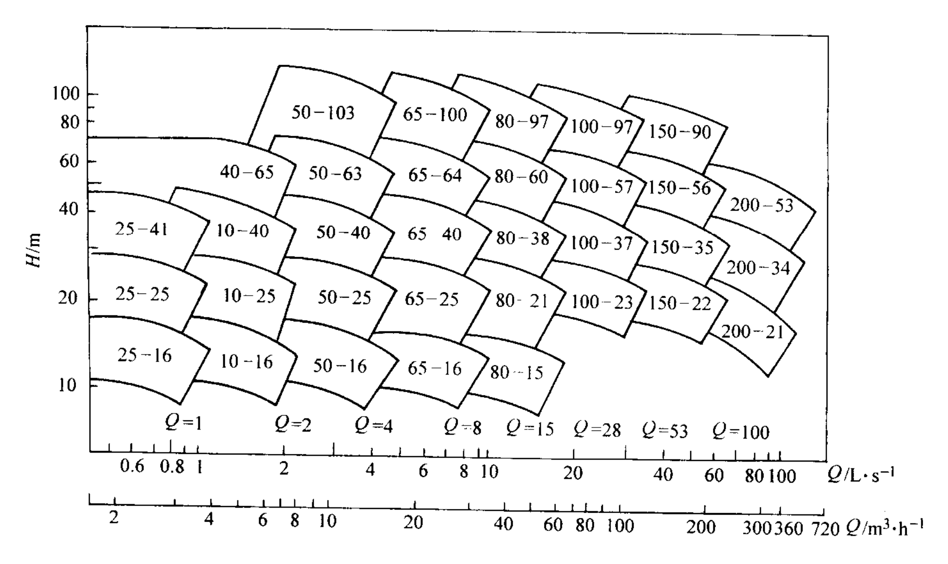


图 4.3-35 离心泵特性曲线

表 4.3-15　电解液槽的结构特点

类型	材料和结构	特　点	结构简图
箱式	不锈钢板焊接 聚氯乙烯板焊接 普通钢板焊接，内衬橡胶 薄壳整体玻璃钢板式	制造方便，占地面积小，但容积小，电解液温度变化大，更换次数多	1—回液管；2—隔板；3—吸水管；4—过滤网；5—蛇形管；6—冷却开关；7—加温开关；8—泄液开关
池式	耐蚀水泥	便于污物自然沉降，容积大，电解液温度和浓度变化小，造价较低；但占地面积大，电解液损耗大	1—电解液池；2—备用水池；3—尼龙丝网过滤器；4—由加工区流回的电解液

3.3.3　热交换器

热交换器与恒温控制器一起构成电解液的恒温系统。热交换器的类型见表 4.3-16。

对于小型电解液槽可将蛇形管热交换器置于槽内。这种配置方式的换热效率较低，但占地面积小，较简便，适于小电流加工。对于大型电解液槽则应将热交换器独立安置，通过传输泵使电解液循环流经热交换器。这种配置方式虽然占地面积较大但换热效率较高，适合于较大电流的加工。

3.3.4　电解液净化及电解产物处理装置

当前在生产中行之有效的净化装置见表 4.3-17 所列。

表 4.3-16　热交换器

类型	特　点	热交换面积	热源	冷源	应用情况
板式	1）换热效率高（比软管式约高 4 倍） 2）占地面积小	用于冷却时 10 m^2/10 000 A（条件：Q_1 流量为 220 L/min，T 为 32 ~ 35℃，电解液槽容积为 9 ~ 15 m^3） 用于蒸汽加热时 0.36 m^2/10 000 A	热水或蒸汽	冷水	国内应用较多，英国 R.R. 公司全用此类型
管式	1）换热效率较低 2）占地面积较大		热水	冷水	美为 Anocut 公司配置；国内小电解液槽内配置

表 4.3-17　电解液净化装置类型

净化方法	原　理	简　图	特　点
孔隙过滤	电解液在吸力或压力下通过微孔塑料或不锈钢网等介质使固态杂质分离	净电解液 电解液进入	1）只过滤固态杂质，胶状氢氧化物则能通过 2）粗过滤置于泵吸口（40 目），精过滤置于工作箱进口（网眼尺寸 25 μm） 3）滤芯可串、并联



续表 4.3-17

净化方法	原　理	简　图	特　点
沉淀	电解液中胶状氢氧化物在槽中自然沉淀或通过斜板或加絮凝剂使之加速沉淀	来自加工区的电解液 脏电解液 净电解液	1）净化效率较低，沉淀速度决定于加工材料及温度，顺序为钛合金＞镍基合金＞铁基合金，48℃时 $Fe(OH)_3$ 沉淀速度：27.2 mm/min，但可用絮凝剂加速 2）分离系数较小，废液含水量大 3）简便 4）占地面积大
离心分离	用高速旋转离心机将电解产物分离		1）效率高、分离系数大，叠片式又优于桶式 2）可以边加工边净化，始终保持整个加工过程电解液的纯净 3）设备投资大，维护较复杂，国外广为采用，国内尚无适合电解加工用的产品

表4.3-17所列孔隙过滤法及沉淀法在国内广为应用。国内孔隙法的过滤元件多用不锈钢网，国外则用微孔塑料筒。对于电解产物的净化国外多用离心分离法，效果良好。国内则用沉淀法，这是由于国内尚无适合电解加工用的离心过滤机，如进口则成本高昂。沉淀法虽简易，成本低，但由于净化效率低，无法边加工边净化，因此在电解加工过程无法保持电解产物的含量恒定，只能在其含量超过标准时重新更换电解液。

在沉淀器的设计计算中由于金属氢氧化物为胶体状悬浮物，占的体积大，因此金属体积与氢氧化物体积之比经常选用1:100，按此比值计算，则1.57～2.4 mm^3/（A·min）的金属蚀除量所产生的氢氧化物体积为157～240 mm^3/（A·min），将此值与加工电流相乘，即为金属氢氧化物的生成速度。在计算中还要知道氢氧化物的沉淀速度，图4.3-36所示为Nimonic合金的氢氧化物的沉淀速度变化的规律，可以看出，电解液温度升高时，沉淀速度加快。从此图中可以算出液温为48℃时，该氢氧化物的沉淀速度为27.2 mm/min。有了上述两种数据即可根据沉淀槽的结构计算出其容积的大小。

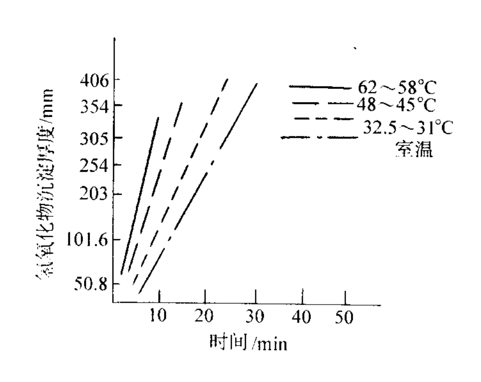


图 4.3-36　Nimonic 合金的氢氧化物沉淀速度

离心机的容量主要决定于加工电流，可参考表4.3-2选定。

板框压滤机是电解加工三废处理的主要手段，其工作原理及特点见表4.3-18。

表 4.3-18　板框压滤机简介

废液处理方式	原　理	简　图	特　点
板框压滤	混浊电解液在压力下打入密闭的板框内，清液从滤布渗出，电解产物则留在滤布上被压成干渣	混浊液 清液	1）脱水率高，压出干渣含水量小，一般为20% 2）一般作为集中处理废液用，但也可与机床并联，边加工边净化电解液 3）结构简单，维护方便，建议采用

近年国内试用在电解液槽的进口至出口处与主回路并联一板框压滤机，使之在线工作，因而可边加工边净化，以保持加工过程电解液中的电解产物含量低微。此法对电解液的适时净化有明显效果。

在选定板框压滤机的规格性能时，过滤面积系数一般选6 m^2/10 000 A，过滤压力为0.6 MPa。板框压滤机应选用耐蚀型，国内的型号和规格见表4.3-19所列。



表 4.3-19　板框压滤机规格

型号	XAJZ60F/1000－30	FBAS12/450－25	型号	XAJZ60F/1000－30	FBAS12/450－25
过滤面积/m^2	64	12	压榨压力/MPa	≤0.6	1
板框尺寸/mm	1 000×1 000	450×450	板框材料		玻璃钢
滤饼厚度/mm	30	25	主要外形尺寸（长×宽×高）/mm	4 580×1 470×1 475	2 990×1 150×872
装料容积/m^3	1				
过滤压力/MPa	≤0.4		自重/kg	12 000	1 995

4　电解加工电源及短路保护系统

电源是电解加工设备的核心部分，如前所述机床和电解液系统的规格都取决于电源的输出电流。同时电源的波形、电压、稳压精度和短路保护的功能都直接影响电解加工的阳极溶解过程，从而影响电解加工的精度、表面质量、稳定性和经济性。除此之外，一些特殊电源对于电解加工硬质合金、铜合金等材料起着决定性作用。

电源随着电子工业的发展而发展。电解加工电源从 20 世纪 60 年代的直流发电机组和硅整流器发展到 70 年代的可控硅调压、稳压的直流电源；80 年代出现了可控硅斩波的脉冲电源；90 年代随现代功率电子器件的发展和广泛应用，又出现了高频、窄脉冲电流电解加工电源。电源的每一次变革都引起电解加工工艺的新发展。由于国内外电子工业的差距，电源是电解加工设备中国内外差距一些环节，体现在电源的容量、稳压精度、体积、密封性、耐蚀性、故障率和寿命等诸多方面。因而电源是国内的电解加工设备中亟需改进和提高的另一重要环节。

短路保护系统是电解加工电源的重要保护部分。它不仅保护电源自身，而且还要保护阴极，使工件在短路时烧伤程度最小。电解加工电极制造周期较长，成本较高。多数情况下工件的成本亦较昂贵，特别是大型、多工位加工的工件如机匣、整体叶轮等，一旦一处短路烧伤将导致整个工件的报废，其经济损失是巨大的。对表面质量要求甚严的零件如航空发动机叶片，表面烧伤将影响其使用的可靠性及寿命，因而电解加工的短路保护系统有重大的作用。电解加工电源的整流、调压、稳压及斩波在原理上国内与一般直流电源或脉冲电源并无根本的差别，而电解加工电源的短路保护系统则是由电解加工工艺引发出来的、为电解加工电源所特有的问题。在这方面，无论是功能上以及快速性、稳定性、可靠性上国内与国外均有一些差距。

4.1　电解加工电源的基本要求

1）电源的额定电流应能按所要求的速度加工机床所设计的最大加工面积的工件，其具体的计算方法见式（4.3-1）。

由于电源电流超过 4×10^4 A 后，导致主回路并联的均流问题、电源本身的散热问题都较难解决，电源的成本也将大为增加。而且在工艺上，如此大的电流引起的加工间隙内电解液的温升、电解产物的排除、导电系统及工装的发热、变形均成为重大问题，故迄今电解加工直流电源最大额定电流为 4×10^4 A。对特大面积的加工则应从工艺上采取措施，用低电流密度方法来解决。例如低浓度电解液，混气加工及脉冲电流加工等。因受功率器件性能限制及大电流快速关断的技术难度，方波脉冲电源的容量仍较小。目前国内已研制出的高频、窄脉冲电源（千赫级）为 2 kA，中频脉冲电源（百赫级）为 3 kA，低频准正弦波脉冲电源（工频级）则可达 5 kA。国外工频等级的矩形波脉冲电源最大可达上万安培。

2）电源的额定电压一般在 8～24 V 范围内可连续调节（详见本章第 1 节）。电源的稳压精度一般为 ±1%，脉冲电源则可稍放宽。纹波系数一般无要求，国外仅个别厂家要求 5%。故除与脉冲电源配套的直流电源需加滤波外，一般直流电源均不加滤波。常用的最低电压为 10 V，此时电源仍应能输出额定电流。国标规定直流电源的稳压精度是在输出电流变化量从 20% 到满负载的条件下测定的。但为便于调整电压，从空载到满载均维持输出电压恒定是有利的。美国 Anocut 电源即是如此。

3）耐蚀性好。由于电解加工是在大电流下进行，因而电源应尽量靠近加工区，否则传输线路压降较大，导致能耗损失大，特别是脉冲电源还将导致波形传输的畸变。这样就要求电源的耐蚀性好，能承受腐蚀性气体的工作环境。还应在大电流条件下连续工作稳定、可靠、无故障。作为电源出厂的综合鉴定，应能达到满负荷条件下连续正常工作，直到变压器及功率元件均达到热平衡，不再温升为止。

4.2　电解加工电源的基本类型

4.2.1　直流电源

（1）电解加工直流电源的发展

当前国内外电解加工生产中绝大部分仍采用直流电源。早期采用直流发电机组，其缺点为占地面积大、噪声大、效率较低，调节灵敏度较差，导致稳压精度较低，短路保护时间较长。随大功率硅二极管的发展，硅整流器电源逐渐取代了直流发电机组。其主要优点是可靠性、稳定性好，效率较高，功率因数高。简单型的硅整流器采用自耦变压器调压，无稳压控制和短路保护。也可采用饱和电抗器调压、稳压，但其调节灵敏度较低，短路保护时间较长，约25 ms，稳压精度不够高，仅为 5%左右，且耗铜、耗铁量较大，经济性不够好。随大功率可控硅器件的发展，可控硅调压、稳压的直流电源又逐渐取代了硅整流器电源。现国外已全部采用此种电源，国内大电流电源亦全部采用此方案。其主要优点是调节灵敏度高，稳压精度可达 ±1%，短路保护时间可达 10 ms。如配置快速可控硅保护装置，其保护时间可达微秒级（详见后）。早期的可控电流由于大功率可控硅管性能不稳定，容量又较小，多路并联均流问题较复杂，加之分立元件的触发性能亦不稳定，因而故障率较高。近年发展的大容量模块式可控硅、GTO（可关断可控硅）及集成块的触发单元较好地解决了电源的可靠性和稳定性问题。可控硅整流电源的另一优点是效率高，节铜、节铁，经济性较好，但在深控时开通角较少，等效的功率因数较低。

大容量可控硅电源多采用水冷，必须控制水质以防污垢堵塞冷却通道。小容量电源仍可采用风冷。主回路分原边可控及副边可控两种类型。原边回路可用 Y/Δ 降压启动。副边回路小容量电源多用三相桥式整流，大容量则采用双星形反并联回路。

（2）国内的可控硅直流电源

国内电解加工用的可控硅整流电源经部级鉴定投入使用的规格已齐全（表 4.3-20），其性能基本上能满足使用要求。

表 4.3-20 国内几种可控硅电源

型号	额定电流/A	额定电压/V	输入电压/V	冷却水压/MPa	柜体尺寸/mm	稳压精度/%	类型	生产厂
KGXS 3000/6 - 24	3 000	24	380$^{+10\%}_{-15\%}$ 50Hz		高 2 100 宽 880 深 2 100	±1[①]	水冷、密封	北京变压器厂
KGXS 5000/24	5 000[②]	24	380 ± 10% 50 Hz	0.2 ~ 0.3	高 2 100[③] 宽 700 深 1 500	±1	普通水冷（不密封不防蚀）	上海整流厂
KGXS 10000/3 ~ 20	10 000	20	380 50 Hz					上海整流器厂 北京变压器厂
KGXS0 15000/24	15 000	24	380 ± 10% 50 Hz	0.2 ~ 0.3	高 2 100[③] 宽 1 000 深 1 800	±1		上海整流厂
KGXS 20000/15	20 000	15	380 50 Hz			0.5		北京变压器厂

① 条件：电网电压变化 ± 10%或负载变化 25% ~ 100%。
② 可输出额定电流的电压范围为 12 ~ 24 V。
③ 外加控制柜 700 mm × 700 mm × 2 100 mm 及主变压器。

存在的主要问题是变压器体积大（未用水冷），主回路并联支路仍较多，因而占地面积大。未构成整体密封柜，因而耐蚀性能差，使用寿命较短，锈蚀引起的故障率仍较高。某些工厂采用电源单独隔离间的措施后，情况有所好转，但厂房面积加大，汇流排线路长，压降大，能耗大。目前虽已吸取美国 Anocut 公司先进技术研制出 3 000 A、10 000 A 水冷密封电源，但后者稳定性可靠性尚未完全解决，有待进一步改进提高。

（3）Anocut 直流电解加工电源

20 世纪 80 年代以来国内引进了数台 10 000A、20 000A 美国 Anocut 公司可控硅全水冷密封型稳压电源，经长期生产现场使用效果良好，其主要特点为：

1）稳压精度高，负载从 0% ~ 100%变化时，电压波动仅 ±0.25%，为其他可控硅电源的电压波动的 1/4。主要原因之一是在电压反馈信号的比较回路中采用了高精度的给定信号。

2）主回路采用原边调压方式，在交流输入的每一相绕组中串入一对反并联的可控硅。副边采用双星形反并联线路，双星形回路之间串入一平衡电抗器。副边每一相只用一只大容量硅二极管，因而避免了多路并联造成的不均流而烧坏管子的问题。

3）采用全水冷方案，除功率器件为水冷外，主变压器副边绕组亦用水冷空心铜管绕制成，因而其体积大为缩小，约为国内自冷变压器的 1/4。为防止水冷系统凝露而引起短路等故障，柜内顶部装有冷却循环风的水冷热交换器以维持柜内温度为 25℃，并保持柜内空气干燥。

4）采用全密封柜体。由于采取了上述诸措施，电源总的体积大为缩小，因而所有部件均安装在一个柜体内。又由于解决了电源长期工作的可靠性、稳定性问题，以及水冷凝露问题，因而柜体采用了全密封结构，只有在正常检修时才打开柜门。这样就杜绝了腐蚀性气体进入柜内而引起元件的锈蚀和损坏。

由于采取了上述技术措施，较好地解决了电解加工直流电源的稳定性和可靠性问题。该电源可以在额定电流下连续正常工作 8h，经过长达二十余年的使用，性能仍保持良好，证实其技术方案成功，值得借鉴。

该公司的电源已形成系列，其规格、性能见表 4.3-21。

表 4.3-21 美国 Anocut 公司水冷密封电源规格

型号[④]	额定电流[①]/A	额定电压/V	输入电压/V	输入功率/kW	冷却水流量/L·min^{-1}	柜体尺寸/mm	重量/kg	稳压精度/%	类型
M3KSWT	3 000	2 ~ 18 或 2 ~ 25	460 ± 10%[②] 或 420 ± 10%	90（18 V） 125（25V）	19	高 1 980 宽 813 深 1 067	1 125	±0.25[③]	水冷，密封，空调，防蚀型
M5KSWT	5 000			150（18 V） 208（25 V）	22.7	1 982 813 1 067	1 350		
M10KSWT	10 000			281（18 V） 391（25 V）	56.7	2 057 1 220 1 220	1 575		
M20KSWT	20 000			460（18 V） 640（25 V）	75.6	2 057 1 220 1 220	2 025		

① 在全部电压范围内均能输出额定电流。
② 订货时可以提出 380V，50Hz 的要求。
③ 负载从 0% ~ 100%或电网电压变化 ± 10%。
④ 该公司还有 30 000 A、40 000 A、30 V 规格的电源。

4.2.2 脉冲电流电解加工电源

(1) 脉冲电源的分类和发展概况

电解加工用的脉冲电源的类型见表 4.3-22。早期的脉冲电源主要是为了解决某些特殊材料电解加工的需要，例如用直流电源加工硬质合金时只有碳被蚀除，表面状况不均匀，加工速度低，容易短路。采用表 4.3-22 中所列的特殊电源加工铁、铜、铜合金及硬质合金均获得良好效果。随脉冲电流电解加工工艺的发展，研制脉冲电源的主要目的是为了提高加工精度，改善表面质量，简化、稳定电解工艺过程，将电解加工从一般加工提高到精密加工水平。其发展方向为加大输出电流，提高脉冲频率，改善其频率特性，缩小脉宽，提高电源的可靠性和稳定性。

表 4.3-22 电解加工脉冲电源的类型

类型	波形示意图	工作原理	特点	应用范围
正弦波脉冲电源	U, t	硅二极管半波整流	1) 频率 $f=50$ Hz，脉宽 $t_p=10$ ms，占空比 $D=0.5$，均不可调 2) 加工精度在直流与方波之间，加工效率较低 3) 容量小 4) 对电网功率因数，三相平衡均有较大影响	此为第一代脉冲电源，前苏联曾用于小型汽轮机叶片加工。此类电源局限性大，现已过时，不宜再采用
截断的正弦波脉冲电源	U, t	可控硅整流调压，小开通角、多相巡回触发	1) 低频，毫秒级脉宽，电压、频率及脉宽相互制约，可调范围较窄 2) 加工精度在直流与方波之间，加工效率较低 3) 容量较大，但受功率因数限制，当前国内此类电源最大电流可达万安以上 4) 可以作为脉冲、直流两用 5) 较简便、成本较低	中等模具尺寸半精加工
矩形波脉冲电源	U_2, U_1, t	1) 利用功率电子器件对直流电进行斩波	1) f，t_p，U 相互独立，可调范围宽 2) 加工精度、表面质量可显著提高 3) 目前能达到的容量仍较小，正处于工程化过程	中小尺寸精密模具、叶片的尺寸加工及光整加工
		2) 分类	1) SCR 斩波：低频（数十赫），毫秒级脉宽，国内最大电流为 2 000 A，国外可达万安以上 2) GTO 斩波：中频（百赫级），微秒级脉宽，国内研制的最大电流为2 500 A 3) MOSFET 换流：高频（千赫级），微秒级脉宽，国内研制的最大电流为 2 000 A	
特殊波形电源	I, 0, −I, T_0, T, t	硅二极管三相整流，再叠加一负的直流电压	$U=10\sim50$ V 正向电流1 000 A，$T_0$300°/每周；反向电流300 A，60°/每周；加工表面粗糙度、均匀度均较直流有所改善	硬质合金加工（60%碳化钨，40%钴）
	I, t	三相整流再叠加一频率为 $10^2\sim10^6$ Hz 的交流电	加工速度较不叠加高频交流电的波形增加 2.5 倍，表面粗糙度亦明显改善	
	T(+), T(−), +I, 0, −I, R	负半波尾随正半波起始边		加工钨
	+I, 0, −I, D′	负半波在两个正半波之间		加工铜和铜合金、铁最有效，并可用于加工硬质合金



脉冲电源自身的品质是随功率半导体开关器件的发展而提高的，在现代功率半导体器件出现之前，借助于硅二极管的整流或可控硅的关断而建立的脉冲电源只能获得较小的容量，较低的频率和较宽的正弦波类型的脉冲电流，如表4.3-22所示，远不能满足脉冲电流电解加工进一步发展的需要。

现代功率半导体器件的发展从根本上改变了这种局面。现代功率半导体器件的主要特点是容量大，开关速度快，可以达到大电流、高电压和高频率。1980年代GTO（可关断晶闸管，又称可关断可控硅）发展到了1×10^4 A，8 kV，高频GTO工作频率提高了2~3倍达到3 kHz，在相当范围内可取代SCR。同期MOSFET（功率场效应管）得到快速发展，模块最高电压可达1 000 V、最大直流等效电流可达1 000 A，快速性居所有功率半导体器件之首，开关时间可小到纳秒级，频率可达10^3 kHz，通态电阻可小到4 mΩ，故易于并联，且驱动电流极小，工作稳定、可靠。近年在MOSFET基础上发展起来的IGBT（绝缘栅双极晶体管）复合器件亦已臻成熟，其工作频率较MOSFET的低一等级，约为10~30 kHz，但其电流容量大为提高，可达1 200 A、1 600 V。20世纪90年代，功率电子器件还在继续向提高其频率特性、增大容量、提高电压和发展智能化器件方向发展。MOSFET、IGBT等现代功率电子器件的上述性能给出了实现大电流、高频、窄脉冲电源的现实性，使高频、窄脉冲电流电解加工新工艺技术有望实现工程应用。根据上述功率半导体器件性能的特点，MOSFET换流是1~2 kA电解加工脉冲电源的较佳方案，其频率高、脉宽窄（见表4.3-22），管子的热损小，快速保护性能好，电源结构较为简便，成本较低。对数千安的电源目前已研制出GTO斩波的电源（表4.3-22）其性能优于同等容量等级的SCR斩波的脉冲电源，但近年IGBT的发展已给出了用IGBT换流的现实性，其快速性、经济性将会优于GTO斩波的脉冲电源。对于上万安的脉冲电源仍以SCR方案较为现实。

目前国内外采用功率半导体器件的电解加工脉冲电源均处于工程化阶段，尚未定型，国内研制的已进行产品加工试验的样机主要有下列三种类型。

1）SCR脉冲电源　20世纪80年代首先研制了SCR斩波电源，在钛合金叶片的生产中得到局部应用，显著提高了整平比，但由于频率低，大电流关断的可靠性不够，未能进一步推广应用。另一种SCR电源是SCR整流、调压，小开通角、多相巡回触发的脉冲电源，该电源加工中型连杆锻模，较直流电解加工有显著的提高。

2）GTO斩波脉冲电源　这类电源正在研制开发中，已用该种电源进行了叶片、模具的工艺性试验，在加工精度及表面质量上均获得良好效果，较直流电解加工有较大的提高。

3）MOSFET斩波脉冲电源　1990年代初中英两国学者合作研制了试验样机，进行了模具型腔、叶片、刻字、电解抛光、电解磨、电铸等多种产品的加工工艺可行性试验及气门精密模具的生产性试验，均获得显著效果（详见第5章第1节）。

（2）MOSFET高频、窄脉冲电解加工电源

1990年新型功率半导体器件的出现以及功率电子技术的发展，给出了开发电解加工高频、窄脉冲大电流新型能源的现实性。经过近几年来的基础研究及工艺研究，揭示了高频、窄脉冲电流具有更强的脉冲效应，可改善电解加工阳极溶解过程极间间隙中电场、流场及电化学特征，提高阳极溶解的集中蚀除能力，缩小截止加工间隙，有望实现定域溶解，从而可显著提高加工精度、表面质量和蚀除速度。经过模具、叶片等多种零件电解成型加工的工艺试验，并通过气门模具的锻造试生产，证实了用此法加工出的模具的可靠性和稳定性，以及高的技术、经济效益。电解自身的成型精度可达0.05 mm以内，表面粗糙可达R_a0.56~0.66 μm。单件加工时间为现场车削的1/5；生产周期为1/6，模具总寿命提高了5倍。此项新工艺技术刚开始进入工程化应用阶段，其技术关键是研制工程化的高频、窄脉冲电解加工电源，迄今在国内外均尚未见商品化的适合电解加工特性的该种电源，现华南理工大学已经研制了1 000 A、2 000 A的工程化样机。

1）脉冲电解加工工艺对电源的基本要求

① 参数　频率f、脉宽t_p、占空比D是影响脉冲电流电解加工效果的最重要的参数。试验研究表明，在一定的范围内，随着频率的提高、脉宽的变窄，加工精度、表面质量及加工效率均有所提高。当频率达到1 kHz，脉宽小到μs级，占空比$D\leqslant0.5$时，能较好地满足中小型零件精密电解加工的要求。

脉冲电源导通期间输出的电压范围与直流加工无明显差异。电流密度则比直流加工为高，一般为30~200 A/cm²。快速短路保护时间以μs级最佳。

② 波形　试验研究表明，矩形波脉冲电流无论是在加工精度还是加工效率上均明显优于正弦半波电流。脉冲上升沿最好能达到μs级，关断时有适量的短时反向电流为好，这有利于快速去极化、提高加工精度，并可缩短脉间周期，以提高加工效率。

2）工程化样机　性能指标如下。

最大输出电流，1型，脉冲输出1 000 A（峰值）；直流输出1 000 A；
2型，脉冲输出2 000 A，直流输出2 000 A。

最大输出电压：脉冲输出20 V（峰值）；直流输出24 V。

频率可调范围：100 Hz~20 kHz，连续可调。

额定频率：1 000 A为10 kHz；2 000 A为1 kHz。

脉冲宽度：25 μs~5 ms，连续可调。

占空比可调范围0.3~0.7，连续可调。

输出波形：矩形波。

连续工作4 h，电源参数稳定、工作可靠。

快速短路保护：MOSFET功率器件过流切断时间10 μs，确保在主电源允许的正常工作条件下加工短路时，不损坏功率器件；负载电流切断时间达30 μs，可大幅度降低工具及零件烧伤程度。

4.2.3　高频、窄脉冲电解加工电源工程化样机

已经研制成200 A，400 A，1 000 A样机（见图4.3-37，图4.3-38）和2 000 A样机。

（1）样机方案

样机采用多路并联的MOSFET斩波装置，将SCR调压、稳压电源输出的直流电流源快速换流成高频、窄脉冲的直流脉冲电流源（见图4.3-39，图4.3-40）。

（2）方案的特点及功率MOSFET对电解加工的适应性

1）容量及频段适合中、小电解加工的要求，并有进一步发展、扩大的前景。MOSFET为大电流、高频、低电压的功率器件，正好适合电解加工大电流，低电压的特点，20世纪90年代国外应用MOSFET电源的范围一般从容量2 kA、5~35 kHz到200 A、近100 kHz，也正好满足中小精密件电解加工的要求。近年由于功率半导体器件的快速发展，上述范围已进一步扩大。元件最大电流容量已从20世纪90年代的150 A发展到当今的1 000 A。有望满足中大零件加工的需要。

2）快速性好。MOSFET的开关速度极快，器件开关过程t_s为数百ns级，显著高于IGBT和GTO，可以得到陡峭的微秒级的矩形波前沿和较高的频率，有利于加工精度的提高，还可以做到微秒级的快速保护，从而能极大地减少电解加工中工件和电极的烧伤。

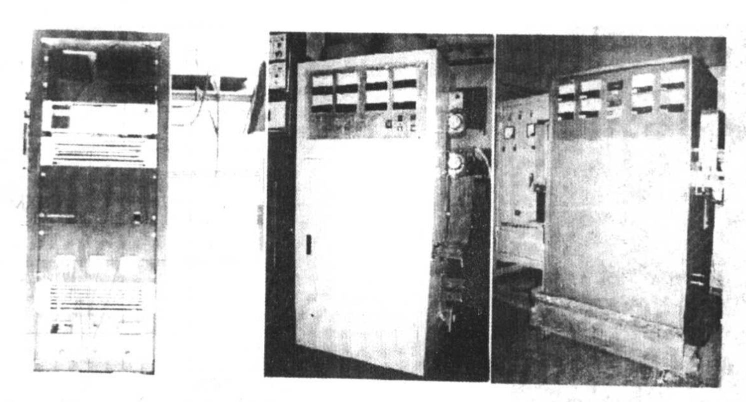


图 4.3-37　已研制出的样机

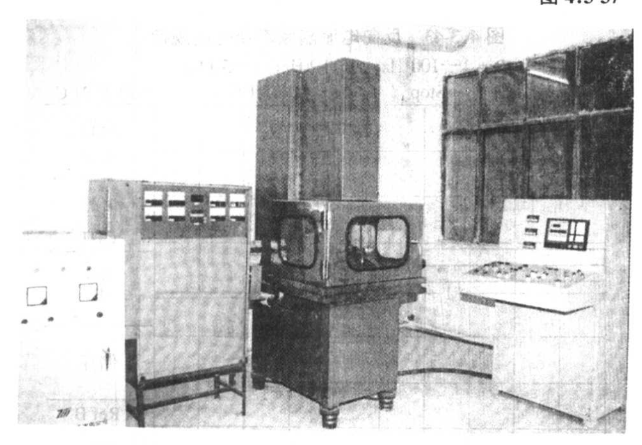


图 4.3-38　1 000 A 高频窄脉冲立式电解加工设备

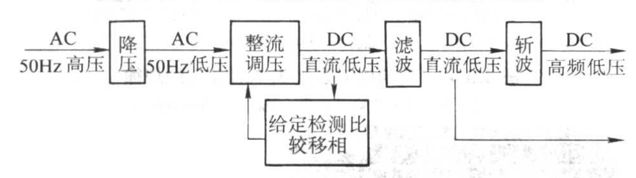


图 4.3-39　MOSFET 高频、窄脉冲大电流电源方框图

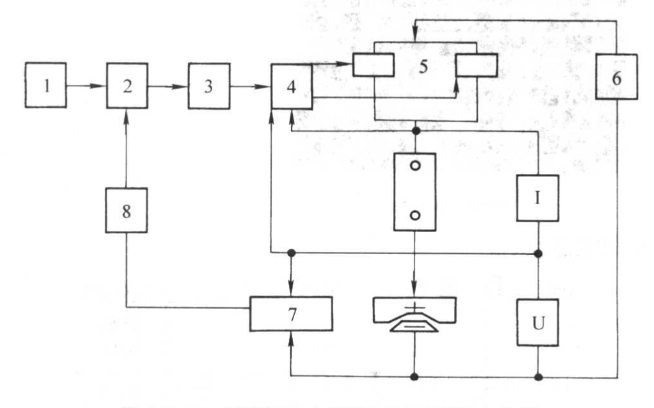


图 4.3-40　斩波装置主回路及控制回路方框图

1—波形发生器；2—光电耦合；3—功率放大；
4—门极驱动及快速短路保护；5—斩波主回路；6—直流电源；
7—欠电压短路保护；8—逻辑回路

3）自身损耗小。MOSFET 导通电阻 R_{DSon} 极小，发展到如今仅数 mΩ，器件开关过程 t_s 极短，因而自身功耗较小，斩波效率高，发热较小，热稳定性好。

4）并联特性好。由于 R_{DSon} 极小，开通时间极短，并且具有电流负温度效应，因而易于并联运行，故能较好的适应电解加工较大电流的要求。

5）击穿电压较低。大电流器件的范围为 100 ~ 200 V。但采取必要技术措施后能满足电解加工电源的需要。

6）驱动功率小。基本上为电压驱动，因而驱动电路较 GTR、GTO 简单，采用带快速保护的 IC 驱动模块，工作可靠，且易于与计算机接口，实现 CNC 控制。

综上所述，MOSFET 的性能特点正好适合中、小高频、窄脉冲电流电解加工电源的需要，是其首选的功率电子器件。

（3）样机所采用的斩波法比较逆变法所具有的特点

1）频率和脉宽可以简便地根据工艺的需要独立无级调整，可调范围宽。

2）主回路仅一次换流，技术上较逆变方案简单易行。

3）便于在生产中推广应用。其整流部分已有定型产品，在技术改造中还可利用工厂原有的直流电源。

4）经济性较逆变方案差。整流器的主变压器体积较大，铜、铁耗损大；在大电流低电压下换流斩波，因而总电流受功率元件电流容量限制，只适应中等尺寸零件的加工。

（4）工程化研制中的关键技术

该类电源的基本工作原理是大电流的快速换流，由此而引出一系列技术难题。由于大电流快速关断及开通过程 $\pm\frac{di}{dt}$ 甚大，同时从功率管到回路的各个环节产生的寄生电感 L_i 和极间电容 C_i 均较大，导致换流过程产生较高的瞬间过电压、过电流和各环节的热耗；加之电解加工的动态微小间隙变化过程，导致大电流短路的机率增大；因而电源工作的稳定性、可靠性问题尤为突出。确保高达千安级的大电流在微秒级内快速换流、以及传导过程中功率管及各个环节的工作能够控制且工作过程稳定、可靠，是电源达到高性能的必须要求，也是本电源工程化研制工作的主要目标。

（5）主要技术难题及所采取的技术措施

1）矩形波波形畸变问题　高频、窄脉冲电源的换流及传导过程，其回路的寄生电感以及大功率元件的结间电容均较大，而且不同加工条件下负载的阻容特性相异，导致波形畸变，如图 4.3-41 所示。注意在线路布局、导线结构上采取多方面措施，使各环节的寄生电感最小，并调整门极驱动回路的输出阻抗与门极输入阻抗的匹配，从而能解决大电流高频下的波形畸变问题，如图 4.3-42 所示。

2）反向电流的变化规律　在大电流快速关断瞬间，在脉间会产生短时反向电流，这有利于脉间快速去极化。反向电流在一定的范围内随脉冲频率提高和加工电流的加大而加强，如图 4.3-43、图 4.3-44 所示。

反向电流还随加工间隙的减小而加大，如图 4.3-45 所示，这有利于加工间隙的缩小。反向电流还改善阳极溶解电流效率的非线性特性。此二因素均有利于加工精度和加工效率的提高。

3）MOSFET 管关断时漏极、源极间瞬时过压 $\hat{U}_{DS}$ 过高，导致功率管击穿问题。

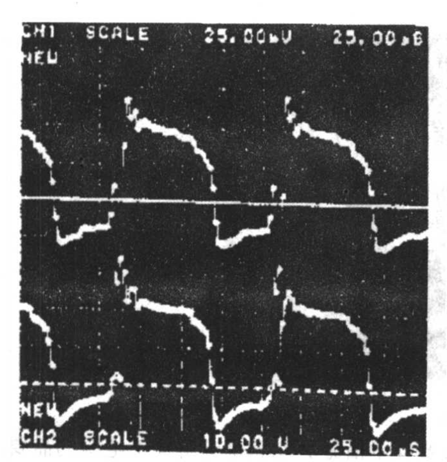


图 4.3-41 试验电源的电流（上）和电压（下）波形畸变

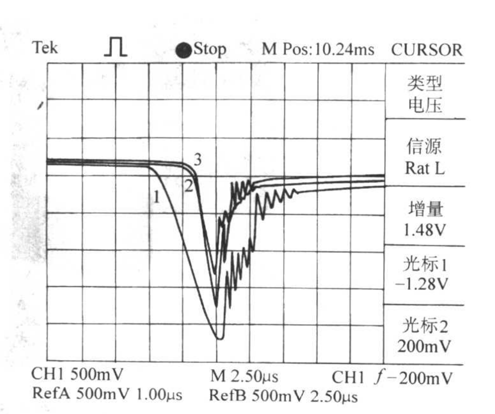


图 4.3-43 反向电流随频率变化的规律

1—100 Hz；2—1 kHz；3—5 kHz

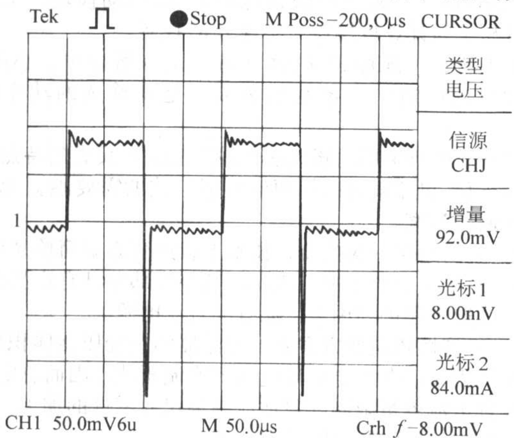


图 4.3-42 工程化电源的电流波形

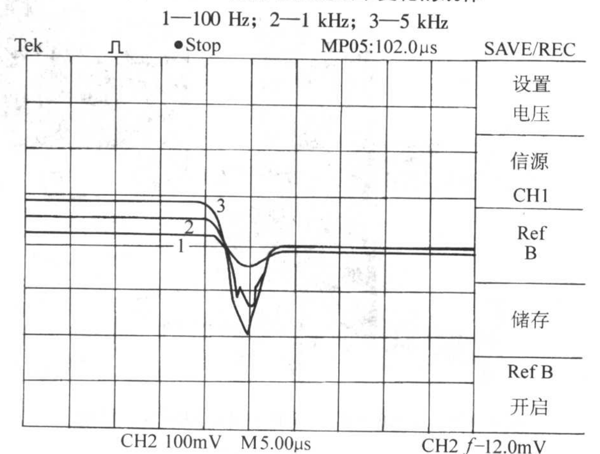
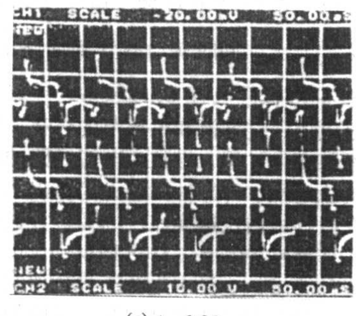
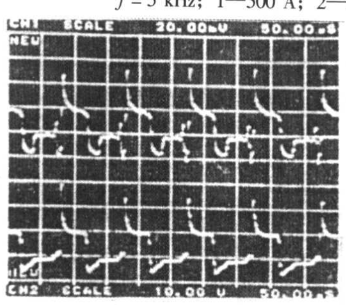


图 4.3-44 反向电流随加工电流变化的规律

f = 5 kHz；1—500 A；2—300 A；3—100 A



(a) Δ = 0.20mm



(b) Δ = 0.05mm

图 4.3-45 反向电流与加工间隙的关系

$\hat{U}_{DS}$源自 $L_s\frac{di}{dt}$，如前所述为确保电流波形的要求，在功率管关断时要求有较大的$\frac{di}{dt}$，这就导致了较高的 $\hat{U}_{DS}$（图 4.3-46），而 MOSFET 的漏极、源极间耐击穿电压 U_{DSS} 又偏低，这是 MOSFET 管过压击穿的主要原因。与此同时频率较高时还会出现关断时的阻尼振荡（图 4.3-46），则会导致开关损耗加大，功率管发热加大，而且随电源总电流容量的增加，$\hat{U}_{DS}$相应加大，阻尼振荡亦更为严重。这就使得此问题对大电流脉冲电源更为突出。

如果在尽量减小 L_s 的同时，还采用组合 RCD 缓冲器和快速续流功率二极管的方案，则可有效地抑制过高的瞬时过压和阻尼振荡，如图 4.3-47 所示，$\hat{U}_{DS}$降低了约 1 倍，而阻尼振荡亦基本消除，较好地杜绝了功率管过压击穿问题。

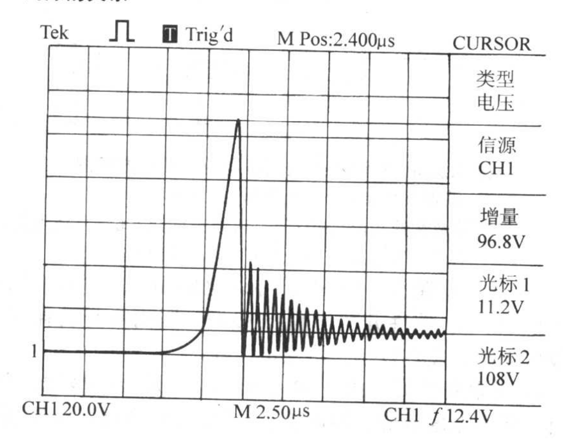


图 4.3-46 试验电源的 $\hat{U}_{DS}$及阻尼振荡



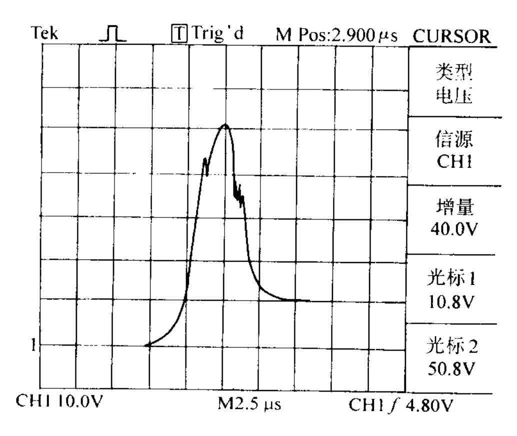


图 4.3-47　工程化样机的 $\hat{U}_{DS}$

4）功率管过热烧损问题　在大电流工作时，功率管的传导损耗 $P_c = I^2_{D(rms)} R_{DS(on)}$ 较大，而在大电流高频条件下，功率管的开关损耗 $P_s = F(U_{DSmax}, I_{Dmax}, \tau_S, f_S)$ 又显著加大。因而导致功率管发热显著加大，结温显著提高，引起功率管的过流、过热烧损。采用适合半导体功率元件冷却的高热流密度、高传热效率、低热阻的新型热管传热散热系统，可使 MOSFET 的工作温度大幅度降低，在同样温度下，安全工作电流显著加大，如图 4.3-48 所示。当 I_{Davr} 为 60 A 时，用热管散热系统的 MOSFET 壳温较用传统的金属翅片散热器的壳温降低了近 50%，而在壳温同为 60℃时，前者的安全工作电流加大了 1/3 以上，能较好解决功率管过流过热的烧损问题，有利于加大电源的容量。

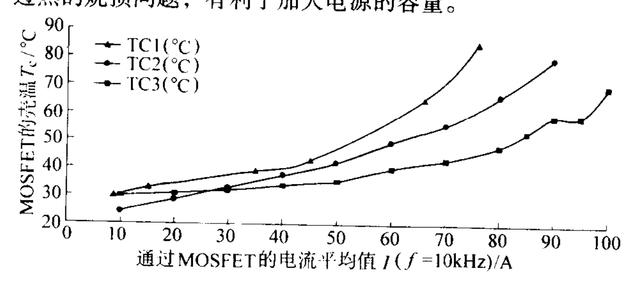


图 4.3-48　三种散热器性能的比较（10 kHz）
Tc1—普通金属翅片散热器时的壳温；
Tc2—水箱热管散热器的壳温；Tc3—两管式热管散热器的壳温

5）快速短路保护问题　如前所述电解加工中快速短路保护是其重要的特殊要求，这不仅有利于电源工作的可靠性，而且可以防止工件和工具的烧伤。

但由于大电流的换流、传导过程时间常数较大，而弱电信号控制强电的快速关断过程的抗干扰性又较差，因而在电解加工中要做到稳定、可靠的快速短路保护历来是一较大的难题。

如前所述，采用关断速度最快的 MOSFET 功率元件以及相应配套的快速功率二极管，能够解决大电流快速换流和传导的难题，在此基础上，采用专为 MOSFET 配套的带有快速限流、切断的 IC 门极驱动模块 MGD，构成大电流快速保护系统，主回路的每一并联支路均配此装置，当该系统的任一支路适时采集到过流信号时，即可在 10 μs 之内切断电源的输出，有效地保护了电源、工件和工具阴极。

由于解决了上述重大技术难题，所研制的样机达到了工作稳定、可靠。满负荷工艺试验使用了近 2 年，功率管无非正常损坏，电源满负荷连续工作达到热平衡后，其各项参数均稳定。在同样条件下反复试验，其各项性能的重复性均好。

4.2.4　脉冲电流电解加工电源还需进一步研究解决的问题

综上所述，脉冲电流电源对当今的电解加工的发展起着相当重要的作用，而现代功率半导体器件的快速发展又给脉冲电源的发展创造了新的技术条件，为实现新型脉冲电源的工程化、产业化，在生产中得到广泛的应用，应进一步提高电源的稳定性、可靠性及效率，同时还应进一步加大脉冲电流容量，提高脉冲频率。

4.3　快速短路保护的特点

4.3.1　电解加工中产生火花和短路的原因

电解加工的极间间隙甚小，在精密加工及脉冲电流加工中可小于 0.05 mm。其间还承受高速流动的气液两相流以及强电磁场形成的动态负荷，由于阳极的不断蚀除和阴极的不断进给，极间间隙又是处于动态平衡的状态中，在如此严峻的极间条件下一旦某处极间间隙过小，该处电解液供给就不充分，因而可能形成电解液流的空穴、局部沸腾，导致工件表面局部钝化不加工而出现尖凸点，最终钝化膜被顶穿而引起短路，或者形成电离通道，产生火花击穿放电而短路。另外还有可能因进给速度突变，电极直接接触或极间滞留导电颗粒而直接发生短路。

火花往往是短路的前兆，在产生火花后，如不能及时控制，加工间隙继续缩小，就会发生短路。但在正常的小间隙加工中出现微弱的火花则往往不会引起短路。

导致火花或短路的主要因素如下。

1）电解液系统的压力、流量与加工电流不匹配，或电解液污浊。前者导致极间电解产物及热量不能及时排除，如供液严重不足则火花和短路几乎就不可避免；后者则引起电解产物或杂质在极间间隙中的滞留而导致产生火花或短路。

2）机床与进给系统刚性不足。这样就有可能因滑枕头的不规则的变形、振动或爬行而导致间隙突然过小，产生火花或直接短路。

3）流场设计不当。工具阴极或工装的流道设计不当或因密封不可靠而局部泄漏，造成加工区流场分布不均，在电解液供应不足处就易于产生空穴、气穴或结疤而导致火花或短路。

4）加工参数选择不当。主要工艺参数如电压、进给速度、电流密度、导电率等匹配不当，造成进给速度大于蚀除速度而直接短路，或导致平衡间隙过小、电解液供给不充分而引起火花短路或局部钝化（结疤）而短路。

4.3.2　电解加工短路保护系统应具备的特殊功能

电解加工短路保护系统有其特殊要求。其中首要的是在产生火花或短路时，工件和工具表面没有或没有明显的损伤，例如烧伤、冶金破坏层等；在排除故障又重新接刀加工后，工件表面不留痕迹，例如环状条纹、凸台等。其次是抗干扰能力强，不受非短路信号的干扰而误动作，例如来自电解设备自身的干扰（大电流通断如 SCR、MOSFET 等功率开关器件以及接触器的通断等）以及周围设备的干扰（天车、焊机及日光灯等）。

为达到上述要求，保护系统应由短路信息检测及快速切断装置两大部分组成。

（1）检测线路应具备的主要功能

1）能较全面采样出短路前可能发生的异常情况，即所产生的预兆信号。表 4.3-23 列举了其主要内容。当前较先进的直流电源的快速短路保护检测系统均包括这些内容。

2）能预置各种预兆信号的给定值。只有当检测的预兆信号达到此水平时，短路保护系统才动作。这是因为上述信号在数值较小时，不一定会引发成短路，而引发成短路的临界值又往往随加工条件而异，因而必须设置有可调节的预兆信号的给定值。如图 4.3-49 所示，电源可控硅开通尖峰以及小的火花尖峰就不应切断电源，而只有出现一系列小的火花尖峰或一个大的火花尖峰才切断电源。

表 4.3-23 产生火花、短路的原因分析

项目	检测信号	给定界限①	主要异常状态的内容
1	工作电流超过最大电流极限 I_{max}	稍大于实际工作电流值	1）加工参数选择不当，加工间隙过小 2）机床或主轴刚性差或主轴爬行产生突然的短路，其他短路预报信号未起作用
2	工作电流增长率 $+\frac{dI}{dt}$ 过大	每秒变化超过 1%～20%	1）间隙中混入导电杂质，引起电弧放电 2）加工参数选择不当，如进给太快，间隙突然减少 3）钝化膜被破坏，形成大能量击穿层
3	工作电流下降率 $\left\|-\frac{dI}{dt}\right\|$ 过大	每秒变化超过 4%～30%	1）混入非导电杂质或堆积氢氧化物和氢气 2）局部地区产生空穴 3）加工表面生成局部钝化膜（氧化膜）
4	工作电压的高频振荡	700～1 400 Hz	1）火花放电 2）混入导电杂质 3）阴极与工件接触
5	极间直接短路		1）阴极，工件直接接触 2）混入导电杂质构成间隙短路桥
6	电压下降率 $\left\|-\frac{dU}{dt}\right\|$ 过大	瞬时电压下降持续时间为 10 μs	1）间隙过小，短路前形成小能量击穿层 2）间隙突变

① Anocut 公司。

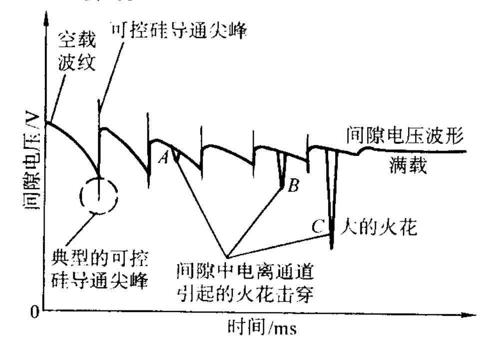


图 4.3-49 工作电压波形及其尖峰电压

3）能调整检测回路的灵敏度（时间常数）。例如 $\frac{dU}{dt}$，$\frac{dI}{dt}$ 回路时间常数不合适，就会引起短路系统误动作，而各个检测回路的最佳灵敏度也因加工条件不同而异，例如工件、机床、加工电流等，因而还要在具体的加工条件下通过试验来确定，而一旦加工条件有较大变化时，就应重新调整。

4）能将各种非短路预兆信号的误信号分离出去。短路保护系统应具有鉴别真假短路信号的能力。由于电解加工是处于复杂的工作环境之中，因而各种干扰信号是必然存在的，例如电源可控硅通、断而产生的电压尖峰信号，这是属于规律性的干扰信号，可以用前述的调定给定信号的办法来处理。又如在电解加工负荷启动时也会出现浪涌电流（图 4.3-50），这时保护装置就必须可靠地使相应的短路保护信号不起作用，启动的熄灭时间应与整流器的容量成正比。另

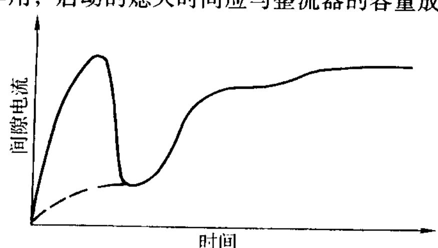


图 4.3-50 电解加工负荷启动时的浪涌电流

一类常出现的是随机性的干扰信号，其分离方法就较为复杂。例如交流电网电压的瞬时波动亦会引起系统的误动作，此时就要能检测出此瞬变信号而及时的使短路保护信号不起作用，这段时间应充分，使得交流电网和极间间隙的瞬变信号能恢复稳定（图 4.3-51）。

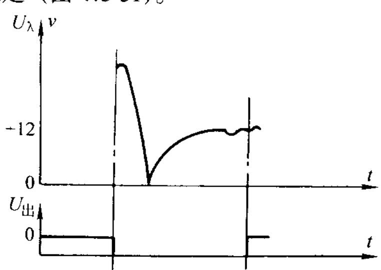


图 4.3-51 电网及间隙中瞬变信号及其保护措施

（2）快速切断装置应具备的主要功能

1）应在微秒级时间内熄灭前期的火花和拉弧、或切断电源并将间隙中由电容和电感存储的残留电能转移出去。这样就可以防止工具和工件的短路烧伤或将烧伤控制到最小而不至于报废工件或工具。另一方面由于功率半导体器件的过载承受能力与过载时间成反比，因而微秒级的短路保护功能也有利于保护功率半导体器件不被短路烧坏。

2）当采用外加的快速切断装置时，其执行元件，例如大容量快速可控硅，以及快速保险的可靠性要好，否则会经常发生非正常损坏元件而频繁更换，将影响其在生产中的应用效果。

4.4 两种有代表性的直流电源短路保护系统

国外应用效果较好的有 Anocut 公司的保护系统以及 AEG 公司的保护系统，以下作一简介。

4.4.1 Anogard 检测系统及 Microbar 切断装置

该系统是国外 20 世纪 70 年代到 80 年代广为采用的、有代表性的直流电解加工短路保护装置。其检测系统功能较全，切断装置快速性好，图 4.3-52 是其方框图。国内 80 年代引进了该系统并已将其国产化，其检测部分使用效果较好，灵敏度高，抗干扰性能好。快速切断装置的工作原理是采用一组快速旁路可控硅（即 Microbar），当短路预兆信号出



现即传输到 Microbar 的门极，使 Microbar 快速开通，将短路电流快速转移到此并联的旁路中，极间电压可在 10 μs 内下降到 5 V 以下（图 4.3-53）。图 4.3-54 是此方案与原使用方案的比较，可以看出其快速性属上乘，可以较好地防止电极与工件的短路烧伤。但国产化的装置在使用中不够稳定，保护快速可控硅的快速保险片频繁烧断，因而未能投入生产使用。目前在国产机床中只采用其火花检测部分，短路时将其预兆信号送至整流电源的可控硅的门极，切断整流电源并停止进给。此方案对 5 000 A 以下的电解加工机床使用效果亦良好。

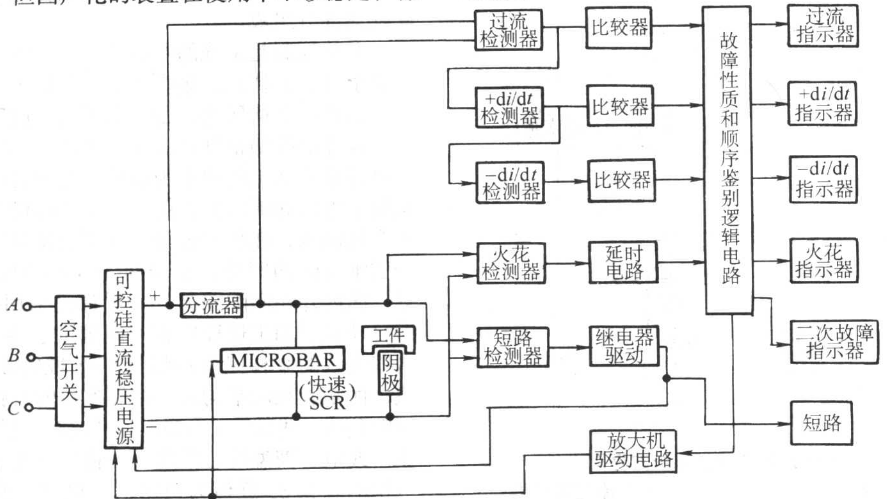


图 4.3-52　Anocut 公司快速短路保护系统原理图

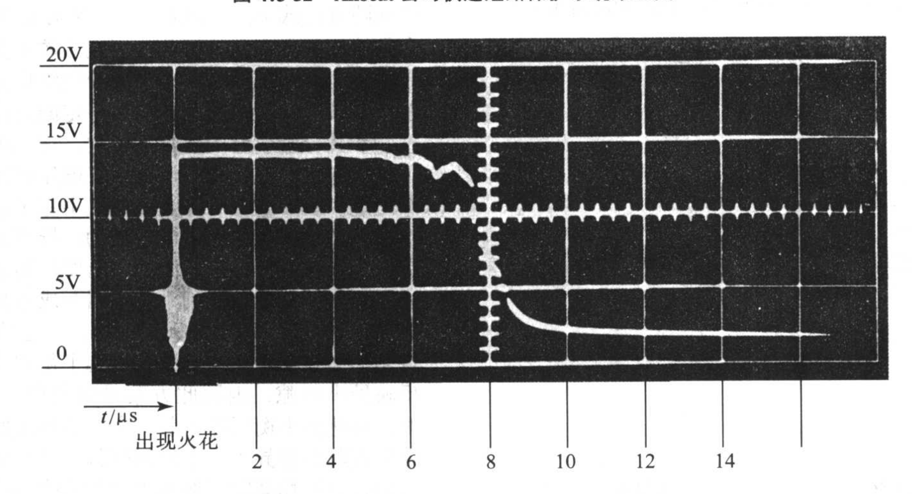


图 4.3-53　Microbar 快速切断时间特性的扫描图像

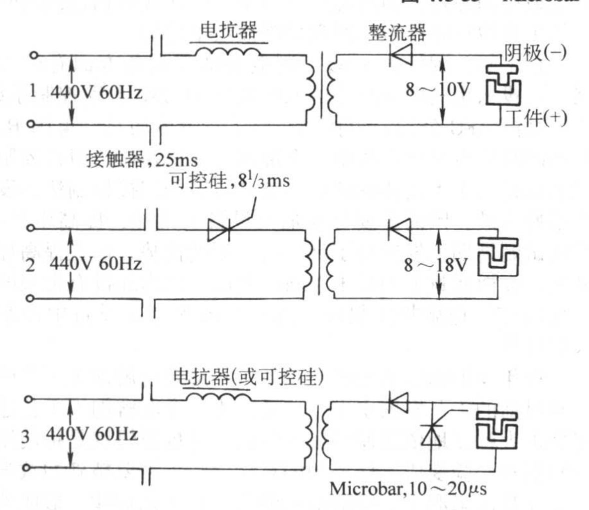


图 4.3-54　Microbar 与其他切断方案的比较

1—接触器转换；2—可控硅转换；3—Microbar 转换

4.4.2　AEG 短路保护系统

该新型的直流电源快速短路保护系统，方框图如图 4.3-55 所示。

此系统的主要特点为：

1）信号检测的功能中有扰流检测、电弧检测以及电流波形检测三项新的内容。前二者均是导致短路的间隙流场和电场的重要的异变因素，采样出此三种因素所导致的相应的极间电压振荡频带作为预兆信号。

2）检测到短路预兆信号后可以立即熄灭前期的短路火花和拉弧，从而防止发展到严重短路。从图 4.3-56 的短路电流随时间变化的特性曲线中可以看到采用这套系统后，最大短路电流仅为额定电流的 0.5 倍，熄灭装置起作用后，短路电流立即下降到 $0.6I_{额定}$ 之内，而不采用此系统时，短路电流可高达额定电流的 3 倍。由于较好地控制住了短路电流的数值，因而不需要频繁地切断电源，在生产中的实用价值较大。

近年国内研制的 SCR 电解加工直流电源其快速短路保护系统采用了 IGBT 管，达到 100 μs 以内的动作时间，使用效果良好，可以防止电极和工件的烧伤。

4.4.3　新型脉冲电源的快速短路保护装置

与 MOSFET、IGBT 配套的驱动模块已具备微秒级快速限流功能，因而这将是一种新型脉冲电源的短路保护装置，其保护功能既高速、又简便可靠，保护波形见图 4.3-57。



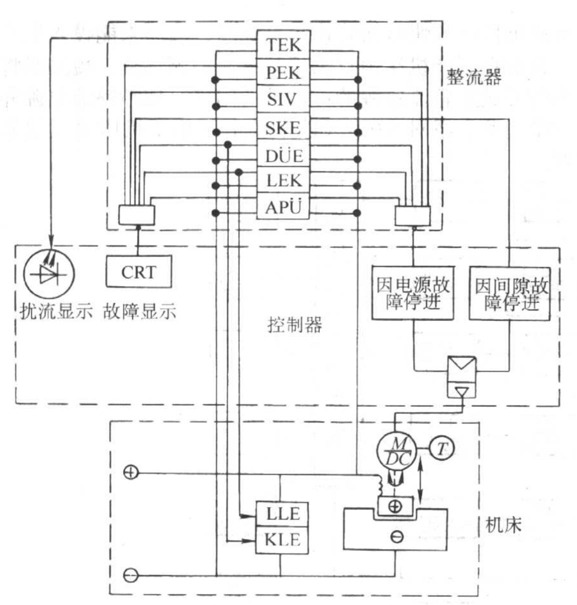


图 4.3-55　AEG 快速短路保护系统方框图

TEK—扰流检测；PEK—钝化检测；SIV—静态电流过流检测；SKE—间隙监控；DUE—动态电流过流检测；LEK—电弧检测；APU—电流波形检测；LLE—熄弧装置；KLE—短路消除装置

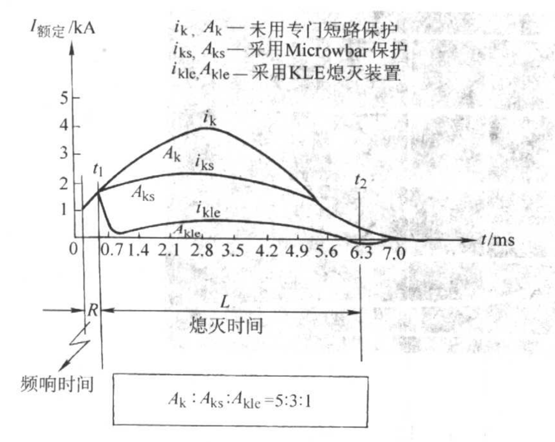


图 4.3-56　AEG 系统的短路电流特性

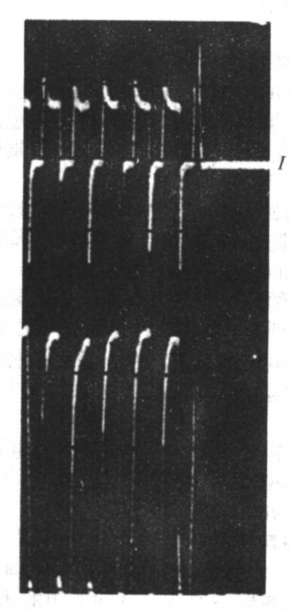


图 4.3-57　快速切断电流、电压波形（切断时间 < 100 μs）

5　电解加工自动控制系统

5.1　控制系统的组成、功能及控制模式

电解加工自动控制系统由参数控制、循环控制、保护和联锁三部分组成。

参数控制是系统的中心环节。它的功能决定于电解加工的要求和工艺特点，集中反映了电解工艺的特殊性。

如在第 2 章所述，加工间隙是电解加工的核心工艺参数。间隙的控制精度是决定工件加工精度的基本因素。理论上最好采用加工间隙作为直接控制的目标，但由于加工间隙是处于电场和流场的作用下，且空间极窄，又是时间、空间的变化函数，在加工过程适时测量是非常困难的，特别是对于三维空间的间隙，至今尚无成熟的能用于生产的采样方案。国内外在间隙控制上几乎都是采用间接、宏观控制法，即自动控制加工过程中影响间隙的主要参数以达到恒间隙，这些参数的采样是在间隙外的区域完成的，因而并非适时值，而是宏观的平均值。控制参数的选择一般均是根据平衡间隙公式［见式（4.1-49）］选取加工电压、进给速度、电导率（或电解液温度、浓度）而将电流效率、阴极和阳极电极电位的总和 δ_E 近似为恒定值。也有选取加工电压、加工电流、电导率，并将电极电位的总和 δ_E 近似为恒定值依据平衡间隙方程式 $\Delta_b = \kappa(U - \delta_E)/i$ 对加工间隙进行控制。在参数控制的方案上又可分为恒定参数法及自适应控制法。前者通过闭环系统控制这些参数分别维持恒定；后者通过控制系统使某些参数之间互相按照一定的规律变化，以互相抵消这些参数分别引起的间隙的变化，达到恒间隙的目的，例如根据电导率的变化相应调整加工电压或进给速度，以维持间隙恒定。在大电流、大流量加工中宜于采用此法，这是由于在加工过程中保持大量电解液的电导率恒定，需要大容量的热源、冷源以及相应的浓度、温度控制系统，在混气加工中还需要气量、液量控制系统，因而成本高，又需消耗较多的能量，故不宜采用恒电导率法。“自适应控制”法的主要缺点是只能控制平均间隙，在达到平衡间隙后，平均间隙可以反映最小间隙，因而此方案是可行的。但在加工复杂型面时，在达到平衡间隙之前，由于毛坯型面的误差，加工表面上各点间隙差异大，平均间隙就不能正确反映最小间隙，这时只控制平均间隙就容易造成最小间隙过小而短路、烧伤，或是最小间隙过大而降低整形效率，因而应根据经验定时调整加工参数，以使最小间隙始终接近给定值。

近十年，国外在 CNC 控制电解加工设备方面有较大进展，凡投入市场的商品化的机床均采用 CNC 自动控制系统，例如德国 AEG 公司，英国 Amchem 公司等均是。英国 R.R. 公司的叶片自动生产线更是全部用计算机控制，但在控制模式上都还属于上述传统的单一参数恒定的间接控制法，没有变革性突破，因而主要是在加大设备的柔性，提高生产率、缩短试制周期上发挥出了计算机控制的优势，而在提高加工精度，表面质量上则尚未有新的突破。国内还没有定型的商品化的 CNC 电解加工机床。这也是电解加工设备中差距较大的环节。

近年发展的模糊逻辑控制系统正适合电解加工工艺的特点和目前的工艺发展水平。这是因为至今电解加工工艺过程仍然很大程度地依靠使用者的经验。模糊逻辑就是将使用者的知识和经验变成试探控制的算法。它不需要精确的数学模式，而是由来源于实践的最佳的经验和工艺规律，形成若干推理形式的控制条规，按照模糊逻辑的法规不断优化参数来调整加工误差，达到要求的加工精度。这是一种适合电解加工特点的自动控制模式，是电解加工自动控制的一种有前途的发展方向。



循环控制的要求是按照给定的程序，控制机床、电源、电解液系统的运作，使之相互协调，一般均按工具阴极进给的位置（深度）转换供电、供液点及变化进给速度等。国内大都采用继电系统来实现。在 CNC 控制系统中则由可编程序控制器完成。

保护和联锁与一般机床的自动控制系统类似，但电解加工机床还有下列特殊保护功能：

1）防止氢气过量而发生爆炸的报警及卸压保护。

2）防止电解液喷出而设置的工作箱门的联锁以及防止潮气进入而设置的电气柜、主轴箱门的联锁。

3）防止因主轴密封件损坏导致潮气或电解液大量进入主轴箱的自动潮气报警以及显示电源柜内渗入潮气的报警。

4）防止工具及工件短路烧伤的快速短路保护。

5.2　电解加工设备控制系统的典型方案及典型元件

5.2.1　参数控制方案

生产中最广泛应用的仍是控制影响加工间隙的主要工艺参数，常用的控制方案如表 4.3-24 所列。

如前所述，近年发展的宽调速交流伺服电机是用于中小电解加工机床进给系统的最佳方案，一套控制系统可同时满足电解加工从低速进给（0.20 mm/min）到快速送进（300 mm/min）的宽调速要求，且无需采用减速装置，可直接拖动滚珠丝杠，因而进给系统大为简化。其位置精度可达 0.01 mm，恒速精度可达 ±1%，电机灵敏度高，可从快速直接转工作进给而无超调、超程，额定输出扭矩可从 0.10～50.4 N·m。这种电机无碳刷，寿命长，且易于维修，外廓尺寸较直流伺服电机为小，易于安装。此控制方案应用于变缠度膛线电解加工机床及电液束小孔加工机床，效果良好。

间隙直接采样方案当前尚处于试验、探索中。表 4.3-25 列举了较为实用的几种间隙直接采样的方案，严格说这几种方案仍属近似方法。其应用范围较局限，未能全面推广应用。

5.2.2　循环过程控制方案

表 4.3-26 列举了几种常用的方案。

表 4.3-24　恒参数控制方案

类别	控制对象	控制方案		特点、应用范围
		名称	控制方框图	
恒参数控制	总电流	电流闭环控制系统	给定；I；分流器或互感器；>；液电或机电伺服元件；拖动元件；V；电极；Δ；I 反馈；电解槽	1）适于膛线、扩孔加工 2）由于叶片毛坯余量不均匀，故初始加工时电流提升阶段间隙差别大，整平比很低，故早期叶片加工机床曾采用，现已淘汰
	进给速度及位置	进给速度、位置闭环电液伺服数字控制系统	给定脉冲列；信号处理；位置指令 $N_指$；速度指令 $f_指$；速度反馈 $f_反$；位置反馈 $N_反$；数字比较；D/A；>；电液伺服阀；油缸；反馈脉冲列；光栅；电极	1）全闭环，控制精度高，刚性好，速度特性硬，出力大 2）用于中、大型精密机床如叶片精密机床，是经过成批生产考验的方案
		宽调速电机，转速、扭矩闭环，数字控制系统	晶体管脉宽调制变频器；电网端变流器；控制调节器；负载端变流器；3AC50/60Hz 380V；DC 耦合；交流主轴电机 0～300Hz 0～400V；M 3AC；转速设定；扭矩设定；闭环转速和扭矩控制；磁场计算机；电极	1）接近全闭环，传动系统简单，精度较高，但大电机惯量较大 2）国外近年已开始用于中、小型电解加工机床，是新发展的方案
		普通伺服电机转速闭环控制系统	给定；>；移相触发；SCR；电机；传动机构；电极；测速机；n 反馈	1）机械传动链长，传动误差未闭环控制，故系统误差较大，进给刚性及速度硬度较差 2）用于一般加工控制
	加工电压	饱和电抗器调压系统	反馈网络；给定；>；移相触发；SCR；饱和电抗器；整流；变压器	1）调节灵敏度较低，短路保护时间较长，稳压精度不够高 2）中期采用，当前生产现场仍占一定比例
		可控硅调压系统	变压器；给定；>；移相触发；SCR 整流器；U 反馈；反馈网络	1）调节灵敏度高，短路保护时间快 2）稳压精度高 3）早期可靠性较差，现已解决 4）国外已全部采用，国内亦占相当比例，建议采用
	电解液温度	电子控制恒温系统	测温元件；电解液槽；t°C 反馈；冷水；冷水阀；泵；给定；电子控制器；热交换器；热水或蒸汽；热水阀或蒸汽阀	1）板式热交换器效率较管式热交换器高 2）冷却系统使用稳定 3）加热系统较复杂 4）一般情况下建议只用冷却系统，加热可用加热器
	电解液压力	气动恒压系统	工作箱；给定；气动压力控制器；气动隔膜阀；水泵；气源；电解液槽	1）气动控制系统使用较稳定、可靠 2）叶片加工时不一定采用恒压控制



续表 4.3-24

类别	控制对象	控制方案		特点、应用范围
		名称	控制方框图	
自适应控制	电压或速度	取电导率信号自动补偿加工电压或进给速度	导电率给定 导电率采样 被调参数反馈网络 被调参数（U/V）调节系统	1）可以代替电解液恒温、恒浓度 2）需要根据具体加工对象调定补偿值 3）电导率传感器以感应式并套于电解液管道上为好 4）仅少量设备采用

注：除表列外尚有电解液浓度、pH 值，一般均用人工调整，AEG 公司则有此二参数的自动控制系统。

表 4.3-25　间隙直接采样方案

序号	名　称	原　理	应　用　状　况
1	周期—循环对刀法	加工过程周期停电对刀，按预置数值自动重新设定再加工的间隙	1）能较好地维持最小间隙接近恒定 2）硬件较为复杂 3）加工效率较低 4）俄罗斯在某些机床上采用
2	原电池电势法	停车后测极间原电池电势值以代表停车时的间隙值	1）要在加工的具体条件下标定 2）只能作停车测量用 3）没有接触误差
3	加工电压波形畸变法	采用正弦波脉冲电源时，当加工间隙小到一定程度后，正弦波顶出现马鞍形畸变	1）只能用于正弦波或截断的正弦波脉冲电流加工 2）可以作为加工过程间隙自动控制系统用（俄罗斯乌发航空学院）

表 4.3-26　几种电解加工循环控制方案

序号	类型	加工循环图	特点、应用范围
1	按最大尺寸的毛坯确定起始加工点，然后按加工电流转换加工程序	$V_{送}$ V Δ I 快速赶刀速度 起始间隙 慢速赶刀速度 稳定加工速度 $I_{工作}$ $\Delta_{工作}$ 稳定电流 触发电流 平衡间隙 起始电流 0 快速赶刀 慢整赶刀 稳定加工	1）毛坯形状及尺寸分散度大时，在赶刀过程间隙大且变化大，故整平比低，遗传误差大，加工精度低 2）早期叶片加工中曾采用。现国外此方案已淘汰，不宜再用
2	按每片毛坯尺寸分别确定起始点，然后按工件厚度尺寸转换加工程序	对刀速度 后退速度 I Δ 稳定电流 平衡间隙 进给速度 中速对刀 退间隙 整平加工 平衡	1）恒参数控制下，自始至终加工间隙基本恒定，故整平比高，遗传误差小，加工精度高 2）适于模锻件毛坯叶片，如配以脉冲电源则可用于小余量半精毛坯加工
3	按工件加工深度转换加工程序	初始速度 V Δ I 起始间隙 初始电流 稳定电流 进给速度 平衡间隙 中速 局部加工 全型加工	1）按型腔截面沿深度的变化规律相应给定进给速度的变化，使加工状态始终处于较佳 2）适于变截面型腔加工，例如模具型腔
4	周期进给按零件加工表面尺寸转换加工程序	冲刷间隙 加工间隙（给定） I Δ 对刀 加工 第二个循环 退Δ 冲刷	1）周期机械校正间隙，可基本维持恒定，并可小间隙加工，大间隙冲刷，加工精度高 2）其他参数如 U、T、浓度的控制精度可放宽 3）辅助周期比例大，效率低 4）为防止断电对刀再通电时工件变形，只适用于刚性好的工件，如模具等

钛合金叶片双面加工时，先停电的一面易于被钝化而产生点蚀坑，而再通电时难于在较小的余量内去除，甚至有可能完全钝化而不加工。后面，表 4.4-6 将介绍一种钛合金叶片电解加工循环的较佳过程，它可以避免点蚀问题。

表 4.3-27 列举了电解加工控制系统的分类及发展过程。目前这几种方案均在应用。可编程序控制器是较为理想的方案，是发展的方向。



表 4.3-27　控制系统分类

分类	组　成	特　点	应　用　情　况
继电系统	用行程开关预给定的程序转换位置	柔性差，且有时不够稳定	国内目前普遍采用
简易数控	1）用数字拨码盘开关预置给定的程序转换位置，并配以位置数字显示 2）用逻辑门及灵敏继电器组合出要求的动作程序	柔性较好，调整位置改变程序较简便、稳定性较好	1）国外原有设备普遍采用 2）国内近年研制的设备采用
微机控制	用单板机或微型计算机的软件控制加工程序	1）柔性好，可储存多种程序，适应多种需要 2）可以实现较复杂的加工程序	1）国外已用于生产 2）国内开始局部应用
可编程序控制器	1）控制器由标准模块搭成，可以根据控制功能要求增减 2）配有实用编程器	1）柔性最好 2）除控制程序外还可控制加工参数 3）抗干扰性强，稳定性好 4）目前成本较高	1）德国电解加工机床已全配置，美国、日本亦开始用于电加工 2）国内电解机床尚未应用，但已开始研制；开关型可编程序控制器已有产品

5.2.3　电导率传感器

电导率是电解加工过程的重要工艺参数，其测量和采样如何能符合电解加工工艺的要求是电解加工自动控制系统中的一个重要问题。必须正确地选用或设计、制造满足电解加工技术要求并能正确采样电解加工过程电导率的传感器。

电导率传感器分电极式与电磁感应式两种类型。

（1）电极式

图 4.3-58 是一种电极式电导率传感器，在密闭容器 3 内

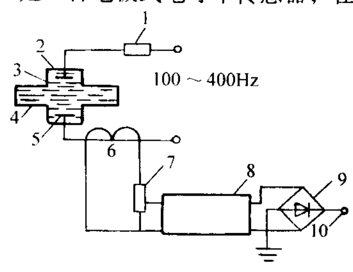


图 4.3-58　电极式电导率传感器原理图之一

1—电阻；2、5—极板；3、4—容器；6—电流变压器；7—电位器；8—放大器；9—整流器；10—输出端

安装两极间距离固定的铂极板，极板上通一频率为 100 ~ 400 Hz 的交流电源，则

$$I = \frac{e}{r} = \frac{e}{K_1\rho} = \frac{e}{K_1}k$$

式中，I 为流经极板的电流；e 为极板间电压；r 为极板间电阻；K_1 为容器常数，决定于电极形状、极间距离。

从上式可以看出 I 即代表电解液的电导率大小。经电流变压器 6 将 I 变为副边的输出电压，加在电位器 7 上，经放大、整流从 10 输出。采用交流电源的目的是为了防止极板极化。图 4.3-59 所示为电桥电极式电导率传感器。其测量原理为用交流电桥测极板间的电阻 r，因 $\rho=\frac{r}{K_1}$（K_1 为电极常数），故测得值亦代表电阻率 ρ。

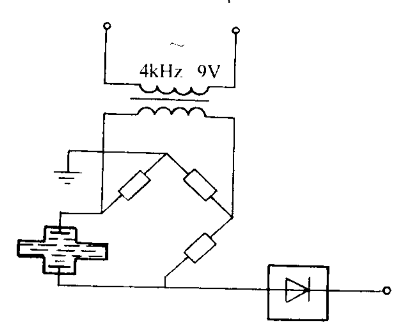


图 4.3-59　电极式电导率传感器原理图之二

电极式传感器结构较简单。但由于测量电极与电解液直接接触，存在电极极化与极间电容的影响，且测量混浊电解液时，表面易被污染而引起钝化；测量流动电解液时，极板易产生振动，电极式传感器只适合于测量电导率较小的静态电解液。

（2）电磁感应式

为了克服电极式传感器存在的问题，发展了一种电磁感应式传感器，其原理如图 4.3-60 所示。传感器由两个同轴安装的磁环组成，其上分别绕有输入绕组 W_1 与输出绕组 W_2，传感器浸在电解液中或套在环形管道上，电解液回路即构成二磁环的共有的一匝绕组 L，传感器相当于两个通过电解液回路互相耦合的变压器 B_1 及 B_2，L 既是 B_1 的次级又是 B_2 的初级。当激磁变压器 B_1 输入一正弦交变电压 $\widetilde{U}_入$，在电解液回路 L 上产生一交变的感应电流 I'，在变压器 B_2 的输出绕组 W_2 上，感应出一个代表 I' 大小的电压 $\widetilde{U}_出$，由于 I' 直接反映了电解液电导率的大小，因此也就表示了电导率的大小的量值。假设 B_1、B_2 为理想变压器时，存在下列关系式：

$$\widetilde{U}_出 = K\mu\widetilde{U}_入 f\frac{W_2}{W_1}\frac{s}{d}\frac{d_L^2}{L}k = K'_k$$

式中，μ 为磁环导磁率；f 为输入电源频率；W_1、W_2 为输入、输出绕组匝数；s 为磁环截面积；d 为磁环平均直径；L 为电解液回路平均长度；d_L 为电解液回路液柱外径；K、K' 为比例常数。

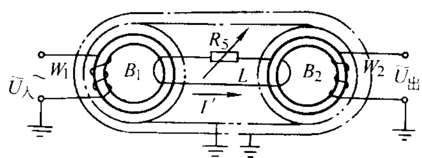


图 4.3-60　感应式传感器原理

—·—电屏蔽；—··—磁屏蔽

图 4.3-61 所示为电磁感应式传感器的一种结构。输入电源频率为 60 Hz，115 V，测量精度为 1%，测量的电导率上限为 6 $\Omega^{-1}\cdot cm^{-1}$。图 4.3-62 所示是另一种结构的感应式传感器，其输入电源的频率为 10 kHz。

上面两种传感器的共同特点是采用了严格的电、磁屏蔽，消除了两个变压器的杂散耦合，使二者只能通过被测电解液回路耦合，同时也屏蔽了外来的干扰信号，这样大大提高了测量精度和稳定性。

感应式传感器的优点是：不存在如电极式传感器中所存在的电极极化、极间电容、电极污染、电极振动等因素的影响，输出信号较大，寿命较长，适合于高电导率电解液控制系统采用。这种传感器可以套在环形管道的叉路上，直接采样进入工作箱前的流动电解液的电导率（如图 4.3-63 所示），根据此电导率信号按平衡间隙公式调整进给速度以达到恒间



隙控制的目标，其控制方案的方框图如表4.3-24中最后一栏所示。此方案用于电解加工叶片的自动控制系统，应用于涡轮叶片电解加工，获得了良好的效果。采集的信号重复精度高、稳定性好，提高了叶片加工精度，一次成型的尺寸精度稳定在0.20 mm之内。

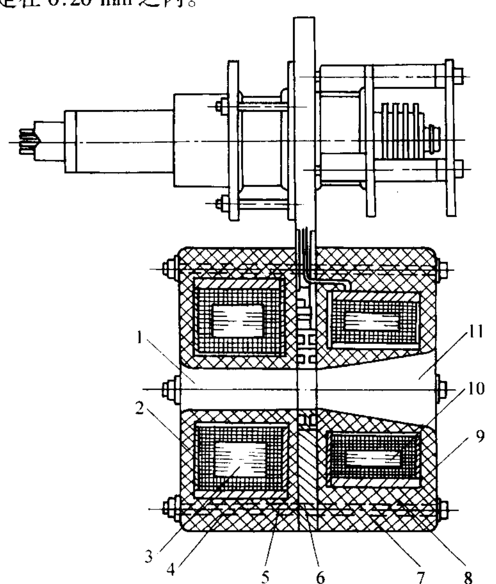


图4.3-61 感应式传感器结构图之一

1、11—中心孔通道；2、9—环氧树脂保护层；3—输入磁环；4、8—黄铜电屏蔽罩；5、7—四氟乙烯塑料端盖；6—黄铜支板；10—输出磁环

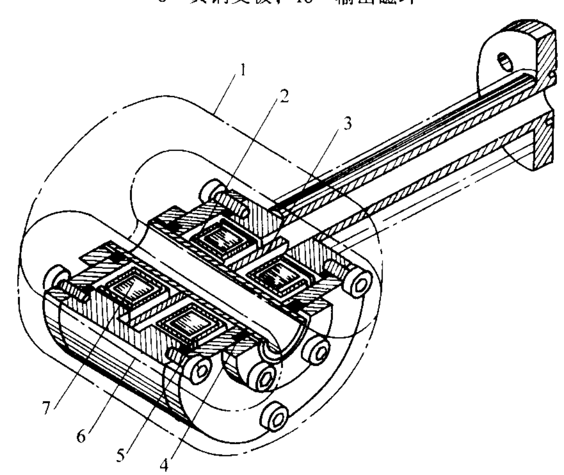


图4.3-62 感应式传感器结构图之二

1—塑料罩；2—磁屏蔽罩；3—静电屏蔽壳；4、5—密封圈；6—不锈钢外壳；7—螺线管变压器

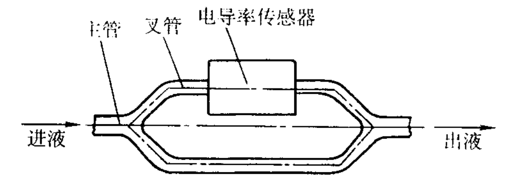


图4.3-63 感应式电导率传感器采样流动电导率示意图

6 电解加工工艺装备

6.1 工艺装备的功能及特殊要求

6.1.1 电解加工工艺装备的功能和组成

电解加工工艺装备由工具阴极和夹具组成，用以确定工件和阴极之间的相对位置，形成正确的极间流场并将加工的电流导入极间加工间隙区。

工具阴极是确保电解加工成型的重要手段，它的设计、制造工作包含型面设计、电解液流动形式和流动通道的设计以及定位、安装结构设计。阴极型面设计及有关的流场设计，在前面有关章节中已作介绍，此不再赘述。

夹具的功能在于安装、定位、夹紧工件，确保工件和工具的相对位置，形成封闭的加工区和电解液流动通道，并将电流导入加工区。

由于工艺装备是电解加工各系统输出的终端汇合点，又是进行电解加工的工作区域，因而其设计和制造的质量直接影响电解加工的效果，是电解加工装备中至关重要的一个部件。

本节重点论述电解加工工艺装备的特性问题。

6.1.2 电解加工工艺装备的特殊技术要求

电解加工工艺装备直接接触腐蚀性介质，且承受较大的动负荷，并传输较大的电流和高速流动的电解液。工具阴极与工件阳极是在小的动态变化的间隙下工作，易发生极间短路，而且电解加工工艺装备的定位精度又是确保工件加工精度的重要环节，因而在设计工艺装备时，必须重点考虑如何防蚀、确保其定位的稳定性和正常地传导电流和输送电解液。绝缘和密封也是设计时必须解决的两大重要的问题。

6.2 特殊材料的选用及结构设计中的特殊问题

6.2.1 解决耐蚀问题的技术措施

夹具中带阳电的金属零件表面会被杂散电流点蚀，或者在不同金属材料之间发生原电池电流腐蚀。因而在选用夹具材料时应尽量采用非金属材料，但为确保夹具的刚性，某些部位仍要采用金属材料。在选用非金属材料时要根据其所在部位的作用选取合乎此部位要求的材料。例如夹具本体材料必须有足够的强度和弹性模量以确保必要的刚度，普遍采用玻璃钢，也有采用铸造陶瓷。定位件材料则必须有足够的稳定性，耐磨性要好，吸水性要小，热膨胀系数要低，要有足够的硬度，可采用陶瓷块或高性能的玻璃钢。导引件如轴承、导轨等则还要求摩擦因数小，磨耗小，可用自润滑油尼龙，其平均摩擦因数可小到0.13，吸水性可小到0.13%/每日，磨耗量小到0.035（300# 水磨，49 kPa·cm³/5 000 r）。

非金属材料选用玻璃钢居多，但国产玻璃钢性能略低，其弹性模量、强度、耐磨性均较差而吸水性则较强，因而不适用做定位件。美国生产的绿色层压玻璃钢在强度、弹性模量、耐磨性、吸水性等性能上均属上乘，如表4.3-28所列。这种玻璃钢可以用于定位件或定位件的绝缘件。瑞士阿奇公司在高精度的电火花机床中采用此种玻璃钢作为阴极安装板的绝缘件，效果良好，加工零件的精度可达2 μm。

表4.3-28 高压层状玻璃钢的高性能指标

抗拉伸强度 /MPa	弯曲强度 /MPa	抗压强度 /MPa	密度 /g·cm⁻³	吸水性 (24 h) /%
455	602	542	1.82	0.08

在金属材料中常用的有不锈钢、黄铜、青铜、锡锌青铜以及莫尔合金，后二者较好，个别处也有用钛合金。必须注意不能选用可能产生晶间腐蚀的材料。

解决耐蚀问题的另一方面的措施是采用绝缘或屏蔽带阴电的表面，特别是靠近夹具的带阳电的零部件处，以切断电场，限制杂散电流。这点对采用阴极保护的机床特别重要，因阳极腐蚀的程度随阴极表面暴露的面积加大而增加。可以用半流体状的合成橡胶绝缘，或用聚氯乙烯板覆盖带阴电表面。在被腐蚀的阳极表面覆盖绝缘层是不可取的，相反应最大限度地曝露带阳电的表面，使杂散电场稀疏地分散在大面



积的阳极表面上。否则就会在阳极绝缘覆盖面的薄弱区域产生深的点蚀坑。

还可采用牺牲阳极的办法保护工件上的非加工部位，特别是榫头定位基准面。具体方案是在被保护的阳极表面上覆盖一层电极电位更低的金属，使之先被腐蚀。也可采用双电源电压的方式，在榫头周围环绕一层金属片，在其上加以更高的电压，将电力线吸引到其上而先行腐蚀此保护层。不同材料的金属配合件的电极电位则应相近，否则造成原电池腐蚀。

在结构设计上应使夹具中带阳电的零件减到最少，甚至少到只有一个阳极导线的终端导电接头（在工厂也称线鼻子）。

6.2.2　确保工艺装备精度和稳定性的技术措施

工艺装备的精度主要指工具阴极相对夹具上的定位面的位置精度。对于按设计图纸制造工具阴极的工件型面和用反拷法制造在精度上有不同的要求。前者必须确保高的绝对精度，而后者主要要求在使用过程中达到高的重复精度和刚度。

为确保高的绝对精度，可以在工具及夹具的安装定位面上加工出精密的键槽，然后用固定键安装在工作台及阴极安装板上。也可用精密的调整/对刀样板、样块或块规，借助于可调键或阴极安装板上的十字交叉键微细调整阴极及夹具的相对位置（图 4.3-64），然后由调整手试加工工件，当工件的位置精度合格后，将可调键固定即可。

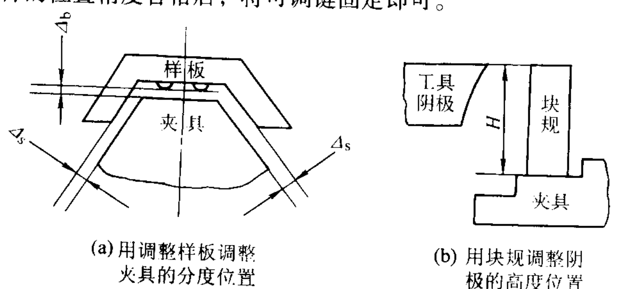


图 4.3-64　用二类工具调整电极相对夹具的位置

Δ_s—侧向间隙；Δ_b—端面间隙；H—阴极高度

为达到高的重复精度，就必须确保工装工作的稳定性，首先是夹具的刚性。由于前述的工作条件，电解加工工艺装备的刚度应达到甚至超过传统的机械加工的工艺装备的刚性，在某些特殊情况下产生的突变的负载可能引起系统的自激振荡，为避免此效应，夹具的刚度应高于仅考虑电解液压力计算所得的刚度。在实际的负载作用下，其变形应限制在 ±0.025 mm 内。决定夹具刚性的主要是其本体，特别是阴极导引段，决定阴极刚性的主要是其安装座及分水器或气液混合器。材料的稳定性也是达到高重复精度的重要条件。金属材料特别是铸件及焊接件必须经过消除内应力的处理。夹紧的可靠性也影响重复精度，除通用的机械、气动、液压夹紧方式外，当采用的电解液压力较高时，例如 1.4 MPa，还可采用电解液夹紧法，如图 4.3-65 所示。

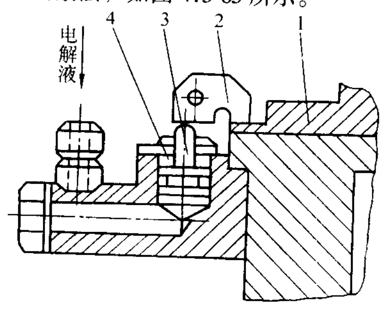


图 4.3-65　电解液缸夹紧工件法兰边装置

1—工件；2—夹紧件；3—活塞；4—电解液缸

为确保电解液进入加工间隙区时流场的均匀和稳定，在进入加工区或通液槽之前必须有进口导流段，为确保加工间隙出口处流场的均匀稳定，在流出加工区后也应有出口导流段，特别是需要加背压时此段更为重要。

导流结构主要取决于电解液的流动方式。正流式加工的导流段置于阴极本体内，反流式加工则要设计专门的水套，与阴极体共同构成进水的导流腔，侧流式的导流段则置于夹具本体（图 4.3-66）或阴极导向装置中（图 4.3-69）。导流段应是流线形并有一定的长度，进液导流段应设计成收敛形；出液导流段如要加背压，一般亦以收敛形为好，如是自由流出则为扩散形（图 4.3-66）。导流段形状较复杂，而且有时需要经过试加工修整，因而多用玻璃钢或有机玻璃，这样也便于钳修。

6.2.3　导流和导电方式

夹具的阴极导引段与阴极滑动面之间的密封（图 4.3-67 中的 *A*、*B* 面，图 4.3-69 中 *A* 面）以及阴极与水套之间的密封均是影响流场的重要环节。根据不同的结构可采用 O 形密封圈、迷宫密封或小间隙密封。对全封闭式流道密封问题尤为重要，如能做到不泄漏则可以取消工作箱，使机床结构简化。

夹具上的导电件是整个电解机床导电系统的终端，应耐蚀和不过热。

工艺装备的导电回路有两类结构：一类是引入导线，将其终端的导电接头直接压紧到工件及阴极的导电面上，可以采用汇流排，多股绞线，铜编织带或多层铜带，大电流则可采用空心水冷电缆；另一类是通过工作台将电流传输到夹具定位块上，通过阴极安装板传输到工具阴极上。第二类工作箱内布局较紧凑、规整，工件、电极装卸便利；但夹具中的导电结构较复杂，必须解决好防蚀，密封和发热问题，因而在工作箱内空间足够时，应尽量采用第一类方案。对于较长的工件或材料电阻率较大的工件最好从两端引电以减少加工电压的损耗并使加工区电流密度均匀，例如加工深孔时可以从工件的中段及阴极的两端引电，加工窄长的钛合金叶片或耐热合金叶片时可从叶片两端引电，导电接头应减到最少，导电面的大小不是重要因素，重要的是接触面平整、光滑，清洁以及足够的压紧程度，应达到接触面产生弹性变形。还可在接触面上涂以导电硅油，含银或铜粉的导电脂，以防止导电面的烧伤或化学腐蚀，因硅油可加速局部发热点的散热，并防止空气或电解液渗入。

除机械接触的导电方式外对于某些旋转的阴极或工件还可用电刷引电，对某些移动的工件或阴极也可用水银槽引电。

夹具与机床应可靠地绝缘，对于采取阴极保护的机床尤为重要。必须严格防止漏电，否则某些绝缘材料例如环氧树脂、电木等在被击穿产生火花放电烧损成碳粉后，变成导体，将发生严重短路。

6.3　几种夹具结构的实例

6.3.1　叶片电解加工夹具

图 4.3-66 是国内普遍采用的叶片双面电解加工的夹具示意图，采用下进水、出口自由喷射式的侧向流动方式。

图 4.3-67 则是另一种叶片电解加工夹具，其定位面采用辅助工艺基准平面，稳定、可靠性好，导电装置采用双斜面导电，多层铜皮双面浮动自位夹紧机构，导电面接触可靠，而且不破坏定位精度。

图 4.3-68 是单面电解加工叶片工装示意图，为防止叶身加工中单面受力而变形，在其背面装有支承件。

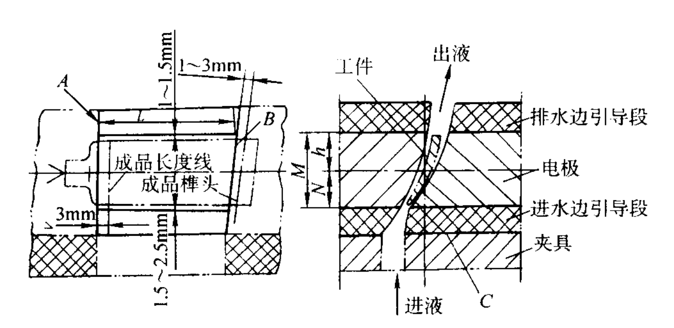


图 4.3-66　叶片电解加工夹具工作原理图

6.3.2　型腔电解加工夹具

图 4.3-69 是侧流式型腔电解加工夹具，采用全封闭流道，由流量调节阀控制进出口压差及流量，采用 O 形密封圈，密封可靠。这是一种较成功的典型的全封闭流道结构。

图 4.3-70 所示是一种工件、阴极全部浸泡在充满流动的电解液腔之中的结构。这种流动方式虽然流速较低，但流场较均匀，在脉冲电流电解加工中使用效果良好。其导电结构采用接线柱经过夹具内部的导电件传导到工件上的方式。

6.3.3　筒形零件电解加工夹具

图 4.3-71，图 4.3-72 为两种筒形零件内壁电解加工的夹具，前者为固定式，后者为移动式。

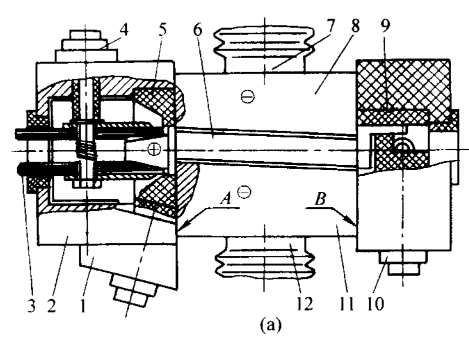
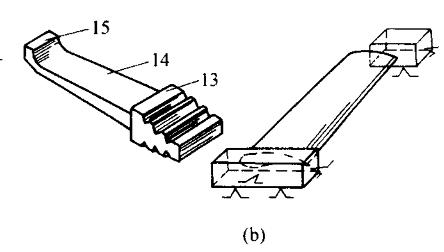
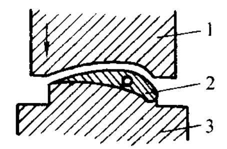
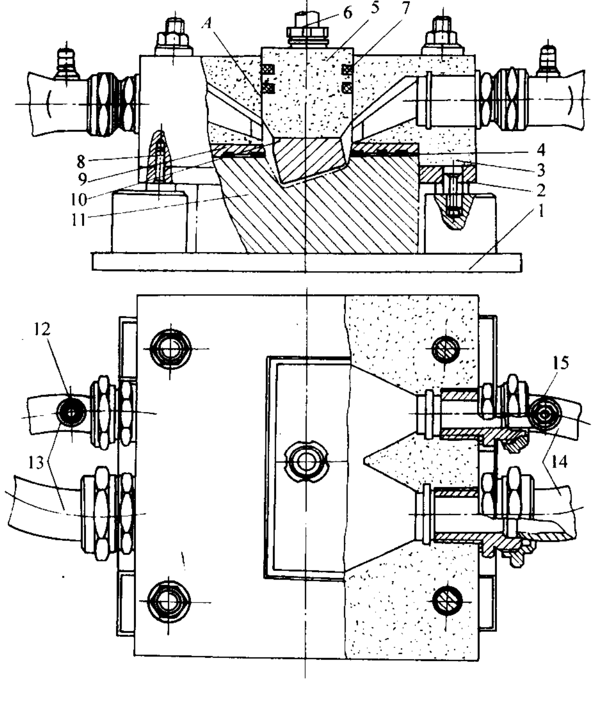



图 4.3-67　叶片电解加工夹具结构图

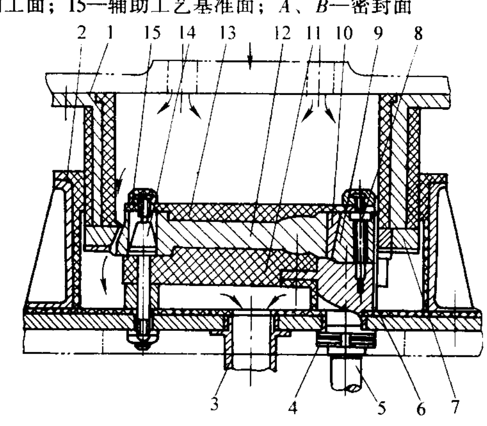
1、10—液压夹紧装置；2—夹具本体；3—导电条；4—导电条夹紧件；5、9—定位件；6—叶片毛坯；7、12—滑枕头；8、11—阴极；13—榫头定位基面；14—叶身加工面；15—辅助工艺基准面；A、B—密封面


图 4.3-68　叶片单面电解加工工装示意图

1—工具电极；2—叶片；3—支承件


图 4.3-69　锻模型腔电解加工夹具

1—底座；2、8—定位销；3—导向盖；4、7—橡皮圈；5—阴极引导部分；6—阴极杆；9—导向盖底板；10—阴极工作部分；11—工件；12、15—流量调节阀；13—进液管；14—回水管


图 4.3-70　连杆外形电解加工夹具

1—基座；2—壳体；3—回水管；4—圆螺母；5—接线柱；6—夹具底板；7—阴极；8—螺栓；9—锥体；10—弹性套；11—支撑板；12—工件；13—阻水板；14—定位柱；15—压紧螺帽

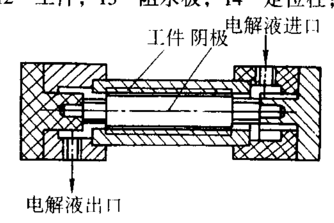


图 4.3-71　固定阴极加工台阶孔夹具

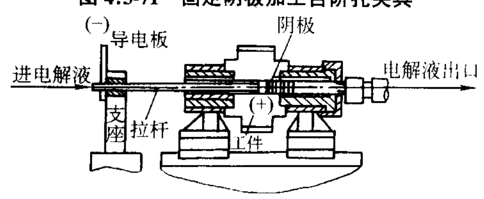


图 4.3-72　花键加工夹具

编写：王建业（华南理工大学）



第 4 章　电解加工的应用

1　概述

1.1　电解加工应用概况

电解加工在 20 世纪 60 年代开始用于军工生产，70 年代扩大到民用生产；航空、航天、兵器工业是电解加工的重点应用领域，主要用于难加工金属材料，如高温合金钢、不锈钢、钛合金、模具钢、硬质合金等的三维型面、型腔、型孔、深孔、小孔、薄壁零件。一般加工范围是：最大加工面积 500 cm^2；最小孔径 ϕ0.05 mm；最大深径比 200；最薄零件 0.50 mm；最长膛线 7 000 mm；最长叶片 1 300 mm；最大机匣 ϕ1 400 mm；整体涡轮转子叶片最小通道 2.5 mm。可以达到的经济加工精度是：型面、型腔 0.10～0.30 mm；花键通孔 0.03～0.10 mm；整体转子叶片套型 0.02～0.10 mm。

国内应用电解加工的对象是：在航天工业中，加工整体涡轮转子类零件、叶片、异型孔、衰减管群孔、各种材料中小异型零件；在航空工业中，加工高温合金、不锈钢、钛合金叶片、整体涡轮转子、机匣、涡轮盘、各种型孔；在兵器工业中，加工膛线、花键、模具、长孔；在核工业中，地面导风轮；在汽车工业中，连杆、摇臂、轴承盖、齿轮等锻模、喷嘴及多种零件去毛刺；在煤矿机械中，已加工近百种锻模，还加工了链轮齿型、花键；在拖拉机工业中，连杆、曲轴等锻模；在汽轮机工业中，三维型面叶片、大型钛合金叶片；在纺织工业中，针织三角等。下面就模具型面加工、叶片型面加工、型腔、型孔、小孔类加工、枪、炮管膛线加工、整体叶轮加工、电解去毛刺等方面做具体应用介绍。

国外应用电解加工较多的国家为美国、英国、前苏联和德国，主要在航天、航空、能源、汽车、汽轮机、机车、纺织、食品、医疗、模具等工业领域，加工了叶片、整体涡轮转子、钛合金零件、机匣、涡轮盘、汽轮机定子坯、零件去毛刺、模具、膛线、各种液压件等多种多样零件。

1.2　选用电解加工工艺的基本原则

1）精度要求适当。一般电解加工可以达到的经济精度前已列出，如果要求精度更高，则不适于采用电解加工工艺。

2）主要用于难加工金属材料、复杂形状零件、薄壁零件的加工。电解加工工艺只是机械加工的一种补充，凡是常规机械加工能解决的就不需要采用电解加工。

3）要有一定批量。因为影响电解加工的因素很多，对一个新零件的加工，往往需要经过一定时间的工艺试验才能定型加工工艺；而且工具阴极的设计制造也是一项技术难度大、花费时间多的工作；再者，电解加工设备的一次投资大；因此，选择电解加工的零件需要有一定的批量，加工数量少则经济成本不合算。

2　模具型面加工

2.1　模具型面电解加工特点及应用范围

2.1.1　模具型面电解加工特点

随着社会经济的发展和科技的进步，人们对工业产品的品种、数量、质量及款式的要求越来越高，模具制造在现代制造业中的重要性和所占比重越来越大，其结构日益复杂，材料性能不断提高，难加工的材料如淬硬钢、不锈钢、高镍合金钢、粉末合金，硬质合金、超塑合金等所占的比重日趋加大，在模具制造业中越来越显示出电解加工适宜难加工材料、复杂结构件加工的优势，它已在这个领域中占据了重要地位。

随着电解加工从军工生产向民用扩展，电解加工在模具制造业各个领域都开始应用。锻模型面加工中，材料硬度高，形状复杂，表面质量要求高，精度为中等，棱边锐度不高，批量较大，正好适应电解加工的特点，因而取得了显著的经济效果。

模具型面电解加工具有以下特点。

1）生产率高、加工成本低。这是由于电解模具是全型复制加工、单方向进给一次成形且进给速度快，因而机动时间较仿形铣、电火花加工大为减少。另一方面由于电解加工表面粗糙度低，没有飞边毛刺，无坚硬的热再铸层及冷作硬化层，因而后续的手工修磨抛光劳动量较仿形铣及电火花加工均大幅度下降。此外，工具阴极不损耗，无需经常修复和更换，因而模具生产周期大为缩短。虽然工具阴极制造周期显著长于电火花加工用电极，但寿命更长，当生产批量大到一定程度后，工具的折旧费就低于电火花加工。在单件工时费用和设备折旧费用上也是如此。基于上述原因，对批量生产的锻模，电解加工成本就低于仿形铣和电火花加工。批量越大，经济效益越显著。这就是当前电解加工主要用于批量模具生产的重要原因。

2）模具寿命高。这是由于电解加工表面粗糙度低，圆角过渡，流线型好，因而磨损小、出模快，减缓了二次回火软化的效应；其次是没有冶金缺陷层，不会产生残余内应力和显微裂纹，因而耐高温疲劳性能好，避免了模具锻造中的拉伤、塌陷、变形等损伤。

3）重复精度好。这是由于加工过程中工具阴极不损耗，可长期使用，因而同一阴极加工出的模具有较好的一致性。

当前电解加工模具的总体精度约在 ±0.05～±0.20 mm 之间。表面粗糙度在 R_a1.6～0.4 μm 之间，其精度与仿形铣相当，但低于电火花加工，而表面粗糙度则比仿形铣和电火花加工低。

2.1.2　模具型面电解加工的应用范围

由于模具型面电解加工的上述特点，使之在机械、航空、航天、军工、五金工具、汽车、拖拉机等工业领域的模具制造中获得广泛应用。表 4.4-1 为国内外厂家的应用概况。

表 4.4-2 对国内外的电解加工模具类型、工艺方案和工具阴极方案及应用范围作了简要的介绍，可供选用参考。

2.2　模具型面电解加工工艺

在各种类型的模具中，除了冲压模是准二维型面以外，其余的如锻模、玻璃模、压铸模、冷镦模、橡胶模、注塑模等均是三维型面，它们的加工都属于三维全型成形加工。因此，欲获得所要求的型面形状和尺寸，最便捷的途径就是按照近似的工件型面等间隙设计阴极，加工中则通过先进的工艺来保证整个加工区内所有位置的加工间隙的均匀性，即通过均匀缩小——均匀放大这样两个环节，将零件的形状和尺寸复制到模具型面上。但是要保证加工间隙的绝对均匀是不可能的，因而这种工艺目前还难以实现，只能近似用于精度要求较低的模具加工。而目前在国内广为采用的是另一种途径，即通过分析和试验来掌握间隙分布的规律性，再据此对



表 4.4-1　国内外电解加工模具的应用概况

	代表厂家	采用电解加工模具的品种、数量	年（月）产量	取数年代（20 世纪）
国内	张家口煤矿机械厂	约 80 种锻模、占全厂锻模的绝大多数	360 件/月	80 年代①
	北京内燃机总厂	锻模，约占全厂模具品种的 80%		80 年代①
	洛阳拖拉机厂	锻模为主，约 130 个图号，2 种阴极，典型件有曲轴、连杆、拨叉等锻模。每个品种批量 5 副～数 10 副/每年	中小模具：几 10～200 副/月 大型模具：几 10 副/月	80 年代①
	长春第一汽车制造厂	试成可投产锻模 46 种，尚开发了注塑模	300 套/年	70 年代
	上海柴油机厂	锻模 16 种型腔，占全厂锻模生产量 49%	171 副/年	70 年代
国外	德国	主要加工铸模、冷锻模、压铸模		90 年代
	挪威	调查 50 台电解机床，其中加工模具占 70%		70 年代
	法国雷诺汽车公司	采用电解、电火花联合加工汽车零件锻模		80 年代①
	意大利菲亚特公司 美国福特公司	加工汽车零件锻模		
	前苏联高尔基汽车制造厂	加工连杆、万向接头轴叉件，十字接头，后桥主动轮、凸轮等 12 种汽车零件的锻模，以连杆锻模为主	400 件/年	70 年代

① 20 世纪 90 年代大多仍在应用。

表 4.4-2　电解加工模具的类型、特点和应用范围

分类	类　型	细　目	特　　点	应用范围
按加工对象分	锻　模	一般锻模	模具的精度中等，各面之间圆滑转接，表面质量要求较高，材料硬度高，批量较大，适应电解加工当前发展水平。可以全面发挥电解加工的优势	已在生产中较为广泛的应用，特别是小倾角浅型腔模具
		精密锻模	精锻模的精度、表面质量要求均高，批量更大，只能采用精密电解加工	正在开发中
	玻璃模 食品模		型腔的表面粗糙度要求较高，而精度则要求不高，因轴对称，故流场均匀，较适应电解加工的特点	国外较多应用
	压铸模	整体式 分块式	形状较复杂，尺寸较大，流场控制及工具阴极设计制造均较复杂、难度较高，但分块式压铸模则较为简便	国外局部应用
	冷镦模		受力较大，对表面质量要求较高，精度则不甚高，可发挥电解加工的优势	中小零件
	其　他	橡胶轮胎模、注塑模	此类模具的合模精度较高，且批量很小，材料切削性尚可，一般不宜采用电解加工	少量应用
按加工工艺分	常规电解（直流电流，水溶液电解液）	NaCl 电解液	高效，低成本，但复制性较差，杂散腐蚀大，阴极设计制造复杂、工作量大	1）预加工 2）精度要求不高的锻模，如煤矿机械等
		$NaNO_3$ 及低浓度复合电解液	加工精度高，杂散腐蚀较小，极间间隙较均匀、稳定，阴极设计、制造较简便但加工效率较低	1）光整加工 2）用于精度高的锻模
	混气电解（直流电流，气液混合雾状电解液）	NaCl 低压混气	整平比及复制精度较高，杂散腐蚀较小但尺寸精度不够稳定，加工效率较低，混气系统较复杂	一般锻模应用较多
		$NaNO_3$ 高压混气	加工精度较高，杂散腐蚀较少，但加工效率低，混气系统复杂	用于精度较高的锻模
	脉冲电流电解（脉冲电流，水溶液电解液）	低频，宽脉冲，准正弦波	整平比高，杂散腐蚀小，极间间隙较均匀，但加工效率较低	用于精度较高的锻模
		高频，窄脉冲，方波电流	加工精度高，无杂散腐蚀，极间间隙小而均匀，阴极设计、制造较简便，加工效率较高	正在开发，尚未用于生产，有望近期用于精密模具加工
	复合工艺	1）EDM－ECM 2）ECM－EDM－ECM	综合技术经济效果好，但工艺过程较繁，机床设备较复杂	国外应用较多



续表 4.4-2

分类	类型		细目	特点	应用范围
按工具阴极分	材料	金属阴极	铸铁，铜，铜钨合金，不锈钢	强度好，结构简单但制造修整复杂	广为应用
		石墨阴极		强度稍差，结构较复杂，流道形式受限，制造、修整简便，耐烧蚀	国外较多采用，国内部分采用
	设计制造方式	反拷、反复多次试加工修正		设计简便但试加工后修整工作复杂，工作量较大，且受工艺条件影响，稳定性较差，加工中经常要修整，使生产准备工作量大，周期长	国内广为采用，国外少用
		CAD/CAM		设计工作复杂、技术难度高，但加工较简便，周期较短	国外多用，但首次加工中仍要试修

工具阴极加以修整，直至加工出合格的型腔。

模具型面电解加工工艺中，工具阴极的制造方法、电解液及其流动形式的选择、电流模式和阴极进给方式的选择是技术关键。

2.2.1 工具阴极的制造

1）机械加工法。对于简单形状的阴极，可采用常规机械加工成形；但对于三维型面的阴极，则工序繁多，修整复杂，加工周期很长。

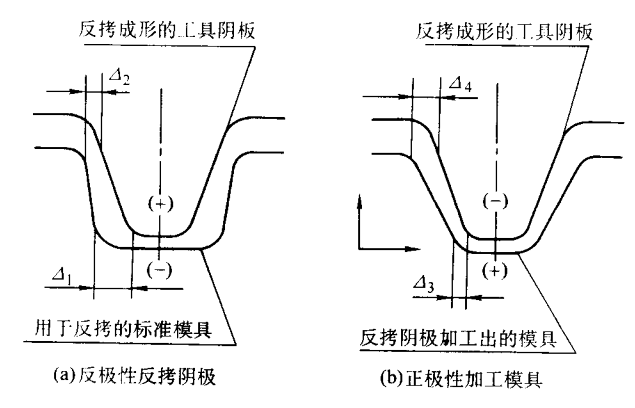
2）电火花加工法。主要用于阴极中窄槽和小孔的加工。

3）数控机床加工法。主要用于高精度阴极的加工。

4）电解反拷法。首先采用常规机械加工法粗加工出阴极型面，再以其作为阳极，标准模具作为阴极，在电解加工机床上进行反极性电解加工（反拷加工）。在已有标准模具条件下，采用电解反拷法可大大缩短制造阴极的时间，因而被广泛采用。但是，加工中需要注意下述尺寸偏差的问题。

在反拷加工时（图 4.4-1a），工具阴极的下端加工时间最长，被去除的金属最多；而上端最后阶段才被加工，加工时间最短，被去除的金属最少。因此，反拷结束时，注意到侧面间隙分布规律，下端的加工间隙（Δ_1）大，上端的加工间隙（Δ_2）小。

如果再用反拷出的阴极对模具毛坯进行电解加工（图 4.4-1b），则与工具阴极上端对应的型腔上口部位的加工时间最长；而与工具阴极下端对应的型腔底部的加工时间最短。因此，加工结束时，模腔上口的侧面加工间隙（Δ_4）大，底部的侧面加工间隙（Δ_3）小。



(a)反极性反拷阴极　(b)正极性加工模具

图 4.4-1 反极性反拷阴极和正极性加工模具的间隙示意图

由上述可见，正反两次加工过程中，加工间隙的分布规律是相反的。由此导致的结果是，与标准模具相比，用反拷阴极加工出的模具型腔的上口扩大了（Δ_4—Δ_2）值，下口又缩小了（Δ_1—Δ_3）值。

针对加工型腔下端尺寸偏小的问题，可以在反拷加工前，对标准模具型腔进行预修整，将其下端部位扩大（Δ_1—Δ_3）值。修整后的模具可作为反拷专用标准模具，它既可用于新阴极的反拷成形，也可用于正在使用阴极损伤后的反拷修复。由于每次反拷时应用的是同一个模具，就保证了反拷成形的阴极的同一性，也有利于提高加工模具型腔的重复精度。

如果生产批量较小，认为修整标准模具麻烦，也可以采用控制加工参数的方法。即反拷阴极时采用小加工间隙；而在加工型腔时选取大加工间隙。依靠两者之间的差值 Δ 来弥补（$\Delta_1-\Delta_3$）。要注意的是，Δ 的数值有时会小于（$\Delta_1-\Delta_3$），而且这种方法会加剧型腔上口的扩大值。

当然，上述两种方法可以结合应用。

另一方面，针对加工型腔上口尺寸偏大的问题，应将反拷成形的阴极的上端部位修小（$\Delta_4-\Delta_2$）值。阴极上下端之间的部位，进行均匀过渡修整即可。

5）石墨电极加工。国内一般采用常规机械加工，再手工修整。国外常采用振动磨削加工。

2.2.2 电解液

早期采用传统的 NaCl 水溶液，其价格低，通用性好，电流效率高，可长期使用。但它不具有非线性特性，因而杂散腐蚀大，加工间隙分布很不均匀，在一般加工中，加工精度不高。

采用非线性电解液可以明显地改善间隙分布的不均匀性，加工中具有切断间隙，因此可提高电解加工精度。常用的非线性电解液为 $NaNO_3$ 水溶液及 $NaNO_3$ 为主要成分的复合电解液。

一般用于模具加工的 $NaNO_3$ 电解液的浓度为 10%～17%，其最高电流效率达 80%。浓度愈低，精度愈高，但电流效率愈低，加工生产率愈低。

为了改善低浓度 $NaNO_3$ 电解液的生产率，开发了一系列的低浓度复合电解液。即在低浓度 $NaNO_3$ 电解液中添加一些盐类，在保持其极小的切断间隙的前提下，提高其最高电流效率，同时也提高了电导率。通常添加盐类为：Na_2SO_4，Na_2CO_3，$NaClO_3$ 等。

2.2.3 电解液的流动形式

对于型面曲率变化较大，或型腔深度较大的模具，如连杆锻模、十字轴锻模、曲轴锻模等，电解液可采用正流式或反流式流动。为了提高加工精度和表面粗糙度，可在电解液出口施加背压，对正流式加工需配置能施加背压的部件。

对于型面流线型较好，或型腔较浅的模具，如叶片锻模、各种类型扳手锻模等，可采用侧流式。

对于形状复杂且精度要求高的模具，还可选择复合流动形式（既有正流又有反流）。



2.2.4 电流模式

通常采用的直流电流电解加工，是一种连续加工。其加工效率高，但加工精度低。一般只用于预加工或精度要求不高的模具加工。

在反拷阴极和加工精度较高的模具时，通常采用脉冲电流，其加工本质是一种有规律的间歇加工，其效果可以促使电解液扰动，改善流场，减小或消除电导率分布不均匀的影响，有利于获得稳定的加工过程，提高加工精度。另外，脉冲电流加工能有效地影响阳极钝化和超钝化的过程，提高切断电流密度，使电解液的非线性特性得到加强，改善加工精度，得到更均匀的间隙分布。

脉冲电流的占空比 D 愈大，切断电流密度愈大，加工精度愈高。但此时由于加工时间太短，加工速度亦随之降低。模具生产中，一般取占空比 $D=1:2\sim1:3$，基本上能兼顾加工精度和生产率。

此外，脉冲电流加工的表面质量（$R_a<0.8\ \mu m$）比直流加工（$R_a<1.6\ \mu m$）为好，能减少流纹的产生。它对流场变化的敏感性降低，使加工稳定性提高，重复精度较高，并有利于实现小间隙加工。

正在开发的微秒级脉冲电流加工，与目前使用的毫秒级脉冲电流加工相比，加工精度和加工效率更高，工艺性能更佳。但是，正式用于生产还有待进一步的试验研究。

2.2.5 阴极进给方式

传统的单方向恒速进给方式，控制简单，操作方便。但是，很难实现小间隙下稳定加工。

采用反复对刀、周期进给或振动进给的方式，解决了小间隙加工时难以排除电解产物和热量的问题，可使模具型腔的加工精度和加工稳定性明显提高。这两种进给方式的缺点是加工效率较低。

目前，周期进给和振动进给的装置国内已研制成功，并已获初步应用。

在最新的电解加工机床上，主轴控制系统已经应用了先进的可编程控制器（PLC）。因而，通过预先设置的变速程序，可实现有规律的阴极变速进给。在其它加工参数不变的情况下，阴极变速进给可以改变不同加工深度下的加工间隙，从而改变加工型腔的侧壁斜度。

利用变速进给这一方式，可以弥补加工型腔侧壁斜度的超差，更有意义的是可以在一定范围内控制型腔母线的形状，如腰鼓形、梯形、台阶形等。这在以前的工艺中是难以通过控制进给运动来实现的。

2.3 典型应用实例

图 4.4-2 ~ 图 4.4-12 是国内外电解加工模具的部分典型应用实例。国内不同类型的模具电解加工的工艺过程见表 4.4-3。

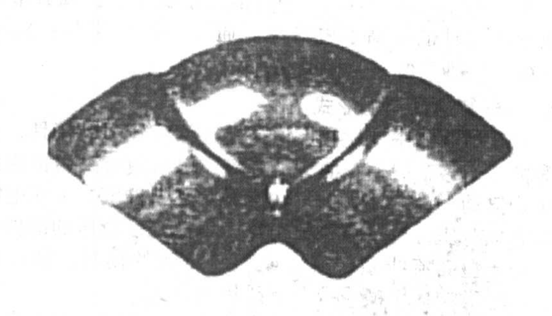


图 4.4-2　弯头锻模

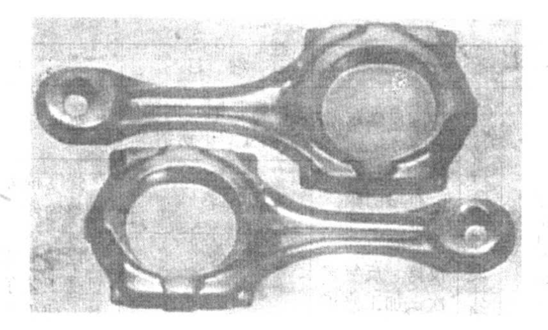


图 4.4-3　连杆锻模

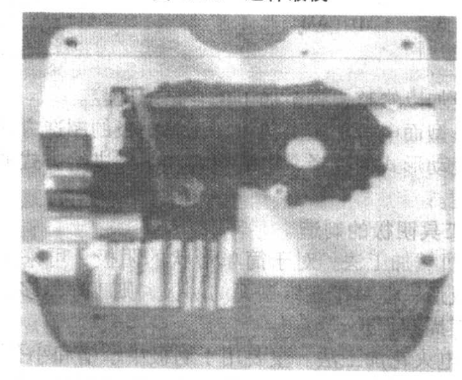


图 4.4-4　齿轮箱压铸模

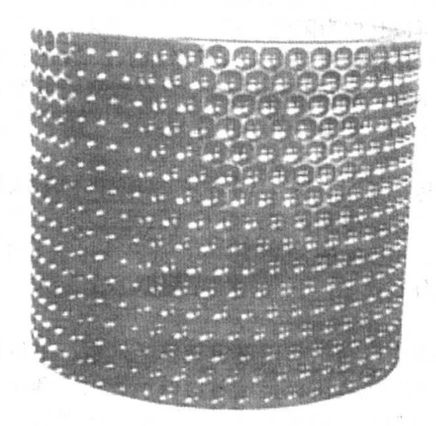


图 4.4-5　炼钢煤球轧辊模

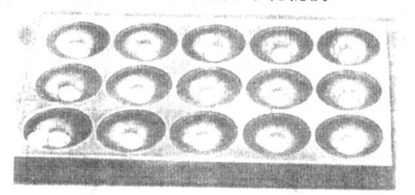


图 4.4-6　多型腔食品烘烤模



图 4.4-7　轴承盖锻模



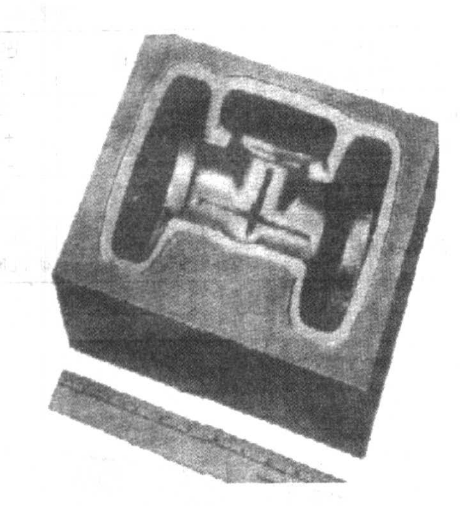


图 4.4-8　三通管接头锻模

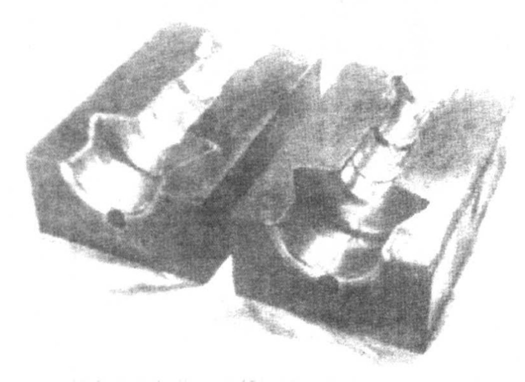


图 4.4-9　齿轮毛坯锻模

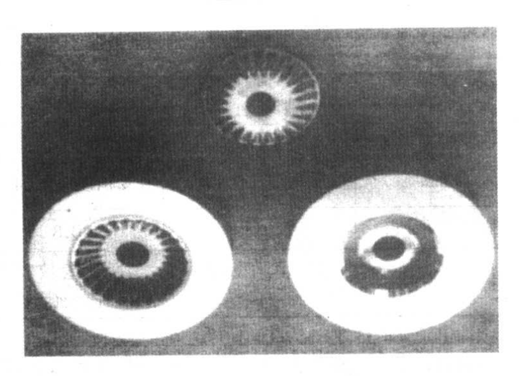


图 4.4-10　锥齿轮冷镦模

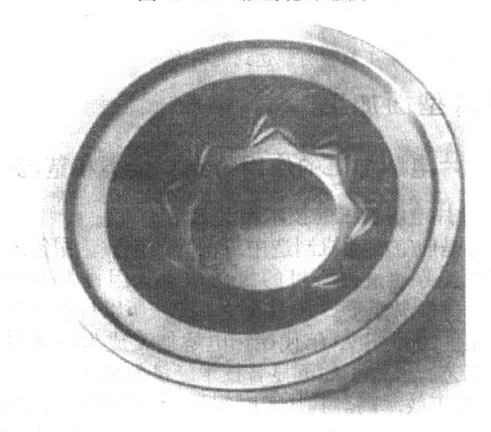


图 4.4-11　玻璃器皿模具



图 4.4-12　扳手锻模

表 4.4-3　锻模电解加工工艺过程实例

零件名称		连杆锻模		空压机曲轴锻模	横拉杆接头锻模	扳手锻模	连接环锻模
尺寸		$S=165\ cm^2$ $H=18.75\ mm$		$S=78\ cm^2$ $H=21.3\ mm$	$S=86.5\ cm^2$ $H=33\ mm$	4 in、12 in	
材料		H11	45Cr4NiWMoV	8Cr3		3Cr2W8V	
工艺类型		脉冲①、水基电解液	直流、混气电解			直流、水基电解液	
电解液		13% $NaNO_3$ + 1% Na_2SO_4	8% NaCl 混气 $Z_o=3$②	$NaNO_3$ 混气 $Z_o=14$，Z_g③ $=1.75$	$Z_o=19$，$Z_g=1.5$	(10% ~ 15%) NaCl, 6% $NaNO_3$ + 2% Na_2SO_4	NaCl
工艺参数	U/V	峰值 20	20		初始 21 终结 17.5	4″：11 12″：24	
	I/A①		2 000④	4 400④	3 600④	4″：900 12″：4 000④	
	$i/A\cdot cm^{-2}$			56.4	41.6		
	$v/mm\cdot min^{-1}$	0.14	初始 0.60 终结 0.32	0.50	初始 0.25 终结 0.32		2 ~ 2.2
	Δ/mm	0.7		$\Delta_b=0.10\sim0.25$ $\Delta_s=0.05\sim0.15$		0.4 ~ 0.8	0.21
	P/MPa	0.8		1.12	1.18	0.5	
	$Q/m^3\cdot h^{-1}$	6 ~ 9.6		6.8	5.0	0.5	
	T/℃	20 ~ 30	27 ~ 43	5 ~ 25	≯40		

续表 4.4-3

零件名称		连杆锻模		空压机曲轴锻模	横拉杆接头锻模	扳手锻模	连接环锻模
加工结果	精度/mm	复制精度 ±0.10，重复精度 ±0.10	截面误差 ±0.10，重复精度 ±0.04	加工精度 0.20，重复精度 ±0.10，复制精度 ±0.05~0.10		型面 ±0.10⑤ 深度 0.07	型面 +0.15 −0.10
	粗糙度 $R_a/\mu m$	0.8	0.8	0.2			0.8
生产厂家		第二汽车制造厂，合肥工业大学	洛阳拖拉机厂，南京航空航天大学	长春第一汽车制造厂		钱江五金厂，合肥工业大学	张家口煤矿机械厂

① 脉冲电流 $f=33.3$ Hz、$D=0.5$。
② 单板机控制气液混合比 Z_o 恒定，Z_o 为标准状态下的气液混合比。
③ Z_g 为实际压力状态下的气液混合比。
④ 平衡电流。
⑤ 局部仍需手工修整方能达到此精度。

3 叶片型面加工

3.1 叶片电解加工的应用特点、分类和范围

3.1.1 叶片电解加工的技术经济效果

叶片是航空发动机制造中最关键的零件。用传统的切削加工方法其劳动量占全机的 30% 以上，因材料难加工、形状复杂、薄壁易变形，且为批量生产，所以特别适合于采用电解加工。20 世纪 70 年代始，电解加工成为叶身型面加工的主要工艺，取得了如下显著技术经济效果。

1）加工效率高。其加工时间显著低于传统的切削工艺，例如英国 R.R 公司加工 RB211 涡轮叶片的机动时间仅 2 min/片，我国航空发动机涡轮叶片加工由传统的机械切削工艺改为电解加工后，其单件工时降到原有的 1/10；采用电解工艺加工长度为 432 mm 的大型扭曲叶片叶背型面，单件工时降到仿形磨的 1/4，仿形车的 1/2。

2）生产周期大为缩短。由于电解加工叶片的工序高度集中，而机械加工叶片工序则相当分散，加之电解加工工具不损耗，因而生产准备周期以及生产周期均大为缩短，例如 R.R 公司的叶片自动生产线（以电解加工为主）的生产准备周期减少到原有工艺的 1/10。

3）手工劳动量大幅度减少。传统的叶片型面加工工艺中手工打磨、抛光的劳动量占了叶片加工总劳动量的 1/3 以上。而电解加工型面由于加工表面质量好，加工变形小，因而后续的手工打磨抛光量大为减少。废品率也大为降低，例如上述大型汽轮机叶片改为电解加工后其废品率由原有的 10% 降到 2%，英国 R.R 公司叶片全自动生产线的废品率亦较原有工艺大为降低。

3.1.2 新结构、新材料叶片的出现以及精密毛坯技术，高速铣削技术的发展对电解加工叶片工艺应用的机遇和挑战

20 世纪 80 年代，随着航空、航天新型推进器的发展，叶片，这个影响发动机性能的关键零件，相应出现重大变革。在材料上，钛合金叶片成为压气机叶片的主体，涡轮叶片材料硬度也有所提高，出现了采用钴镍超级耐热合金、以及用高性能铸造合金代替锻造合金的发展趋势。在结构上也出现了特薄型、大扭角、低展弦比叶片，弯角型、鱼嘴型等特殊型面，带翼翅的大型钛合金叶片以及大缘板、短弧形榫头的超小型高精度压气机叶片；这类高强、高韧、高硬度材料，薄壁、高精度、特型结构的叶片越发需要采用电解加工（加工实例见图 4.4-13 ~ 图 4.4-17），给电解加工的应用和发展带来新的机遇，但其加工难度却大为增加。

另一方面，精密毛坯技术的发展，特别是以铸代锻的趋势，使国外航空发动机叶片有余量毛坯的比例相对减少，这又使应用电解加工叶片的比例相应下降；同时，数控铣削、特别是数控高速铣削技术的发展，使得其在叶片型面加工的

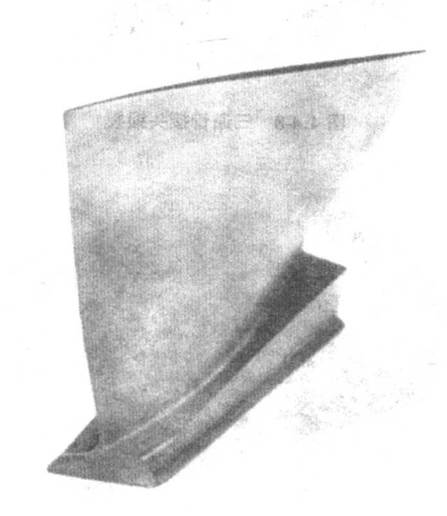


图 4.4-13　大扭角、低展弦比、薄型钛合金叶片

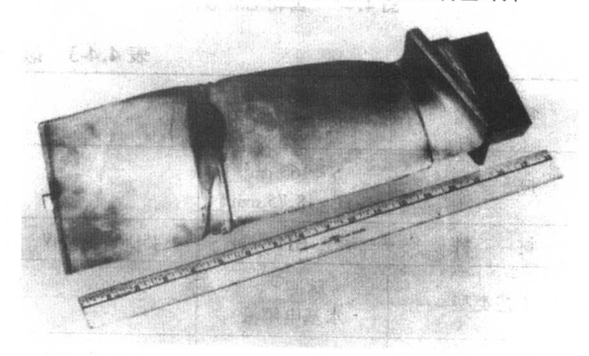


图 4.4-14　阻尼翅、大型钛合金风扇叶片

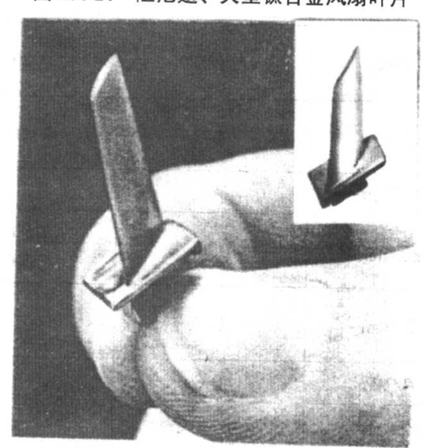


图 4.4-15　大缘板叶片



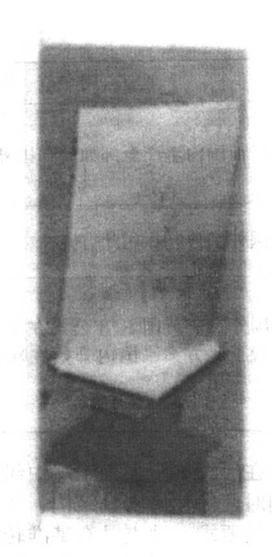


图 4.4-16　短榫头叶片

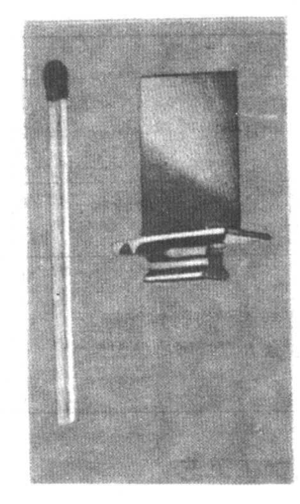


图 4.4-17　超小型精密压气机叶片

应用也越来越多；这都是对应用电解加工叶片的挑战。然而，近期内，国内真正无余量毛坯尚难大量用于生产，所谓无余量毛坯还只是余量小而并不精，这反而增加了后续加工难度，它除手工打磨外，也只能采用电解加工，这又对电解加工的整平比提出了更高的要求。

基于上述种种新需求以及近年高科技发展提供的新技术，20 世纪 80 年代以来叶片电解加工技术虽有了较大的提高和发展，但仍未能出现飞跃性的变革，还跟不上产品发展的需要，这又影响了电解加工叶片在 20 世纪 80 年代后期的发展，甚至某些方面显示出一定的停滞。

3.1.3　叶片电解加工的分类、特点及应用范围

表 4.4-4 是按现有工艺分类，可根据设计要求和所具备的条件参考此表选择加工方案。

表 4.4-4　叶片电解加工分类、特征和应用范围

分类	类　型	特　征	应　用　范　围
加工工艺分类	常规电解（直流，水基电解液）	1）加工效率高 2）整平比低，遗传误差大 3）小间隙，高参数效果好，加工精度较高，但必须采用较高的电解液压力 4）设备较其他类型电解简单	1）国内一般用于中等精度的粗加工、半精加工工序 2）如采用恒参数控制较小的恒定加工间隙，则也可用于精加工，一次加工到最终尺寸和表面粗糙度，英、美、德均用此法 3）此法效率高，故较适于大余量模锻件或板条毛坯
	混气电解（直流，气液混合雾状电解液）	1）整平比高，遗传误差小，可以满足模锻毛坯的要求 2）稳定性较差，尺寸分散度较大，要二次加工才能达到最终尺寸 3）加工电压较高，能耗较大 4）极间电阻大，多采用低参数，故效率低 5）设备、工装较复杂	1）我国目前叶片加工大都采用此法 2）对于大面积加工，在电源容量受限时可用此法 3）由于系统较复杂，加工稳定性难以控制，且能耗大，故新选用时，只适用于某些必要的零件加工
	脉冲电流电解（脉冲电流源，水基电解液）	1）复制性好，整平比高，加工精度度高 2）现用的低频、宽脉冲电流加工效率较低 3）流场较均匀，易于实现小间隙，不易短路、结疤，加工过程较稳定且电解液压力可以较低	1）目前应用的仍是低频、宽脉冲电解加工 2）适于叶片的精加工 3）方波电源效果较好，但目前容量仍较小，只能用于中小叶片加工 4）高频、窄脉冲技术已趋成熟，可在精密叶片领域推广应用
毛坯形式分类	模锻件	1）要求有较高的整平比和进给速度 2）采用恒参数（并自动对刀预置最佳初始间隙）的水溶液电解加工较合适	中、大型叶片成批生产
	轧制条料锻造方料	1）要求有较高的进给速度 2）加工定位、导电较简便，工装简单，生产准备周期短 3）毛坯材料消耗率较高，但对中小叶片综合成本仍低于精锻毛坯	1）中小叶片（$L<100$ mm）批生产 2）新机试制
	小余量精锻、精铸件	要求有很高的整平比，故只能用脉冲电流加工	中、小型叶片成批生产



续表 4.4-4

分类	类型	特征	应用范围
同时加工的部位分类	叶盆、叶背型面	1）设备工艺均较简便 2）边缘倒圆 *R* 及根部转接区的手工抛光量大，质量不易稳定	目前国内生产全部如此，国外亦大部如此
	盆、背型面及根部 *R* 转接、凸台端面	要求采用三头机床或阴极进给方向为斜向切入	国外部分叶片用此方案
	盆、背型面、根部转接区及进排气边缘 *R* 全部叶身型面	1）加工效率高，生产周期短 2）加工质量好 3）用反流式，故流场较均匀、稳定 4）设备、阴极均较复杂，需采用三头或斜向进给机床，复合双动阴极	国外目前英国 R.R 公司在叶片自动生产线上实现了此方案，国内开始在新机部分叶片的试制上应用

3.2 叶片电解加工工艺

3.2.1 叶片电解加工中的特殊工艺问题——基准的选择及工艺路线的安排

在叶身电解工艺方案确定后，电解加工工序中定位基准的选择、以及在整个叶片加工工艺路线中何时安排叶片榫头的加工是一个相互关联的重要问题。它不但直接影响叶片最终加工质量，而且还影响加工的经济性。因而必须慎重对待，合理安排。一般有下列两类方案。

1）采用设计基准作加工定位基准，即先将榫头加工完毕，再电解加工叶身。其优点是没有基准转换的误差，工艺路线较简单，以及加工榫头时定位夹紧刚性较好、夹具较简便，但却给电解加工叶身带来许多复杂问题。首先是定位夹紧误差较大，这是由于叶片的设计基准形状较复杂，因而定位稳定性较差，特别是对于圆弧面枞树形短榫齿，此问题尤为严重，其定位夹紧的重复精度很差；其次是毛坯残余应力和叶盆、叶背加工余量不均匀引起的叶身加工变形，已无法在后续工序加工时消除。这些因素均导致加工成品的叶身中心线偏斜，零件容易超差或报废；再次，已加工好的榫头一旦受到散杂腐蚀或导电过热烧伤也会导致零件报废，在钛合金叶片电解加工中这些问题尤为突出。为避免发生上述问题可采用密封夹头、牺牲阳极、水冷导电块等技术措施，但又导致夹具设计复杂、制造困难且寿命低。有时不得不降低加工电流以避免导电面烧伤，这又导致加工效率下降。在电解加工发展的早期，多采用此方案，但由于上述弊端现已逐渐少用。它只宜用于榫头形状简单、材料不易受杂散腐蚀及烧伤的零件，对圆弧面枞树形短榫齿以及薄型钛合金叶片均不宜采用。

2）采用辅助工艺基准，先电解加工叶身然后再加工榫头。

图 4.4-18 是利用条料毛坯的大平面作为型面电解加工以及榫头加工共用的工艺基准，图 4.4-19 则是采用榫头延伸段以及叶尖延伸段加工出二平面辅助工艺基准。此法优点是定位面的夹紧刚性好，稳定可靠，定位精度高；不易出现导电烧伤和杂散腐蚀，允许通过较大的加工电流；即便是在型面电解加工出现了定位、导电面的杂散腐蚀、烧伤或中心线偏斜、偏移还可在后续榫头加工工序中纠正消除，从而大幅度减少废品；同时还简化了夹具结构、降低对毛坯精度和操作工人技术等级的要求，缺点是有基准转换误差，但由于采用共同的平面工艺基准，因而叶身相对榫头的形位误差反而减小；毛坯的材料消耗稍大，但由于前述的优点此方案综合经济效果仍然较好。两种不同加工基准的叶片工艺路线如图 4.4-20 和 4.4-21 所示。

表 4.4-5 是某航空发动机压气机叶片电解加工中采用平面基准代替榫头基准的加工效果。

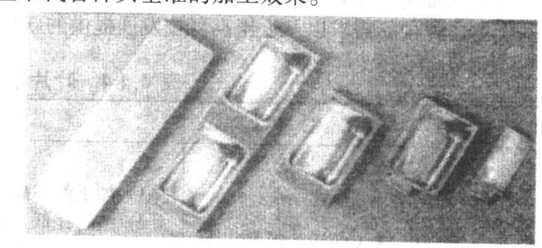


图 4.4-18 条料毛坯平面基准

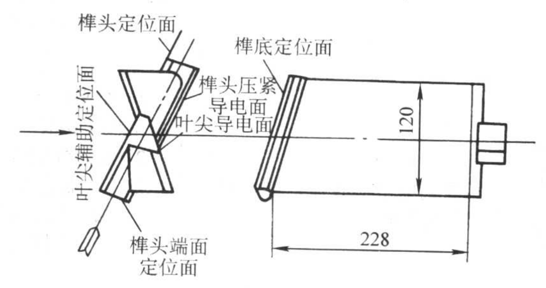


图 4.4-19 模锻毛坯两端辅助平面基准

长方形榫头 → 电解加工叶身型面 → 精加工榫头 → 精抛叶身

图 4.4-20 平面基准的工艺路线（新工艺路线）

燕尾形榫头（留0.03~0.05精磨余量）→ 电解加工叶身型面 → 精磨榫头 → 精抛叶身

图 4.4-21 榫头基准的工艺路线（旧工艺路线）

表 4.4-5 叶片电解加工新旧工艺路线加工效果对比

基准	单面加工投影面积/cm^2	加工电流/A	进给速度/$mm \cdot min^{-1}$	加工时间/min	对毛坯要求	加工精度/mm	报废率	废品原因	电解后工序
平面	22.8×12.0	4 000	0.45~0.5	7	低	0.4~0.45	极低（<1%）	操作不当	抛光
榫头	22.8×12.0	2 000~2 500	0.20~0.25	20	高	0.8 以上	高	榫头腐蚀，导电面烧伤，中心线偏斜	砂带磨+抛光



3.2.2 近几年来发展的叶片电解加工新工艺

（1）叶身全方位一次电解成形

传统的电解加工叶片工艺是只加工叶盆、叶背型面，而进排气边缘、根部凸台端面及转接部位的加工均以手工打磨、抛光为主。全方位电解加工（在英国称 360°ECM）则是在一个工序内一次电解成形叶身全部表面，其成形过程如图 4.4-22 所示。

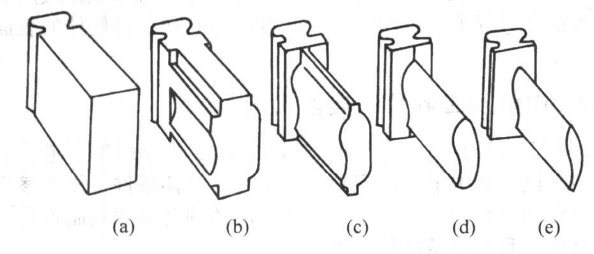


图 4.4-22 全方位电解加工叶片过程

（a）毛坯；（b）、（c）叶身型面、边缘、侧端面加工；（d）叶身型面、侧端面继续加工；（e）全部到最终尺寸

此工艺方案的主要技术特点是以阴极相对叶身轴线呈 45°、60°斜向进给代替传统的垂直进给，以复合双动阴极代替传统的单一整体阴极（图 4.4-23）从而使根部端面亦得到法向进给分量，并在叶片横截面上形成闭合流道，以顺叶身轴向流动供液代替传统的侧向流动供液（图 4.4-24），这样就显著地改善了加工区的电场和流场，使其在形状各异的型面、端面、转接圆弧诸加工区分布均匀，从而得以一次成形，而且避免了因流场、电场不均而造成的空穴、钝化、短路烧伤等故障，显著提高了加工过程的稳定性。

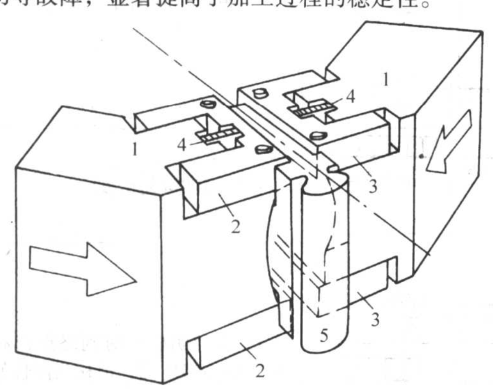


图 4.4-23 斜向进给双动的复合阴极

1—加工型面的主体阴极；
2、3—加工边缘的浮动阴极；4—弹簧；5—叶片

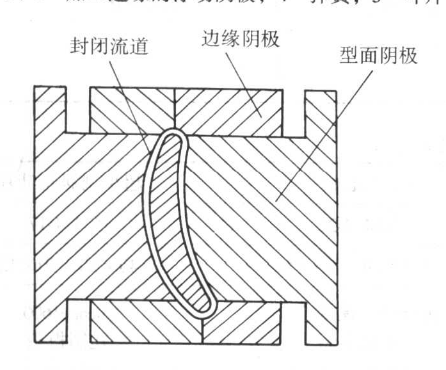


图 4.4-24 电解液轴向流动的封闭流道

此法效率高，工序数大为减少，生产流水周期短，叶身各表面转接好，相对形位误差小。对于加工部位工具可达性差、刚性差的大缘板、超小型、超薄的高精度叶片，此法尤为适用，它避免了多工序加工时可能发生的因相关工序的工具过切、加工变形和杂散腐蚀所引起的各工序间相互影响、干涉以及多次定位造成的积累误差。该加工方案首次用于 R.R. 公司的全自动叶片生产线上加工镍基涡轮叶片及钛合金压气机叶片，型面精度高达 0.076 mm，加工速度每件 4 min。现美国、德国亦已应用，我国也开始用于新机叶片研制，获得良好效果。现国外已生产有斜向进给的叶片电解加工专用机床，如图 4.4-25 所示。

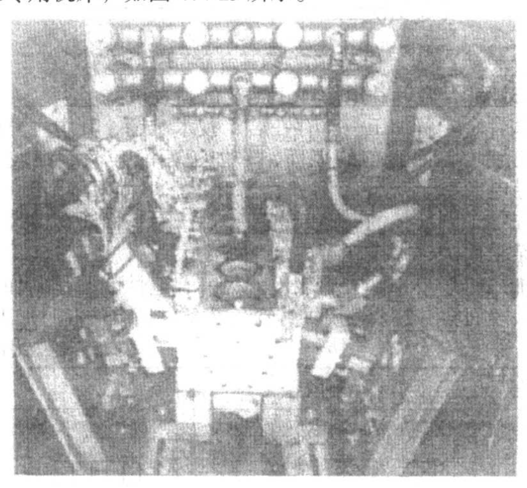


图 4.4-25 Amchem 公司斜向进给叶片电解加工机床工作箱

（2）新式叶片毛坯——条料/方料

传统的叶片锻造毛坯大都采用模锻件，20 世纪 70 年代后期发展了精密锻件，20 世纪 80 年代又有新的变革，许多扭角较小、缘板较窄、尺寸较小的涡轮叶片和压气机叶片的电解加工毛坯，由模锻件改为轧制条料。实践说明，在经济上它节省了大量昂贵的精密锻模，精密定位工具、测量仪器，大大缩短了生产准备周期，提高了新机研制的快速响应能力。其缺点是切断了材料的纤维。采用条料/方料毛坯，虽然叶片材料消耗有所增加，但如上所述综合成本的降低更为显著，因而对中、小叶片（图 4.4-26 和图 4.4-27）总成本反而有所下降。在工艺技术上，条料毛坯提高了对电解加工整平比及整平阶段流场控制的要求。采用全方位加工及复合电解液、脉冲电流电解加工均可以较好地解决此问题。如前所述，条料毛坯还在工艺基准的选用上有显著的优越性，有助于提高叶片综合加工精度和加工稳定性、可靠性，英国、美国、德国、加拿大等国已大量采用，近几年来国内也开始采用。据英国 R.R. 公司的经验，电解加工叶片的条料毛坯经济外廓尺寸以 ≤90 mm × 40 mm 为宜。

综上所述，条料毛坯是电解加工中小叶片成批生产以及新机试制的可取方案。对于大缘板叶片则仍以模锻件为好，对此如仍用条料毛坯则原材料消耗过大，加工时间较长，经济上不一定合算。

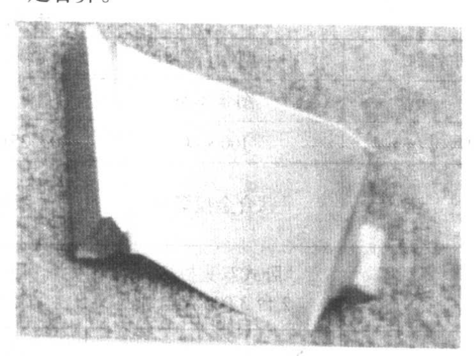


图 4.4-26 钛合金叶片

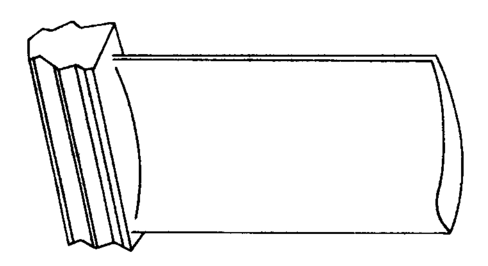


图 4.4-27　镍基合金叶片

(3) 钛合金叶片电解加工工艺的新发展

钛合金电解加工一直存在若干技术难题，其中主要的是难于得到均匀而光整的表面，非加工面的杂散腐蚀较为严重、导电面易于烧伤。例如，当叶盆、叶背两面余量不均时，先加工到尺寸的一面断电后，由于另一面还在继续加工而被杂散腐蚀，则破坏了先加工好的表面，就是将其再度小余量加工仍然得不到光整表面。另一普遍性问题是已加工好的榫头表面容易被杂散腐蚀，在工艺条件稍有偏离时加工面就易于出现各种疵病，例如蓝紫膜、鳞斑、流痕、亮带，黑疤等，这使得钛合金叶片电解加工难于稳定用于生产。如前所述，20 世纪 80 年代以后，由于在钛合金加工用电解液上取得了重大的突破，上述难题才迎刃而解，使得钛合金叶片电解加工在生产中得到稳定、广泛的应用，成为钛合金叶片型面加工的主要工艺方法，在电解叶片生产中占有较大比例。

表 4.4-6 给出了适合钛合金叶片电解加工的循环过程，采用这个过程可以确保叶盆、叶背两面同样获得最佳的表面粗糙度。

3.3　电解加工叶片的典型实例

表 4.4-7 是从国内外现有生产中选出的经过生产考验的典型实例。其中某些内容则受限于厂家具体条件，用户参选时应根据自身的特点，按本节前面阐述的有关原则制定适合自身要求和自身条件的合理工艺。

图 4.4-28 为正水法加工的大型涡轮叶片，图 4.4-29 为大型汽轮机叶片。图 4.4-30 是电解加工的汽轮机叶片。

表 4.4-6　钛合金叶片电解加工循环过程

序号	循环内容	示意图	对机床的要求
1	快进		1）通液下对刀：高分辨度，低接触压力 2）对刀位置重复精度高 3）滑枕头刚性好
2	中速进给，通电解液		
3	对刀，自动测毛坯尺寸		
4	阴极自动退出预置的初始间隙		初始间隙重复精度
5	余量大的面自动先加工（通电、慢速进给）		1）双面阴极同时到终点：双面滑枕头同步精度高，滑枕头刚性好 2）双面平衡间隙相等：恒参数控制精度，滑枕头刚性好 3）高参数 4）电解液净化
6	两面余量相等后同步加工，同时到终点		
7	切断加工电源、停液、快退		

表 4.4-7　叶片电解加工实例

零件名称	中小型钛合金叶片	小型涡轮叶片	压气机叶片	超小型涡轮叶片
图　例	图 4.4-26	图 4.4-27	图 4.4-22	图 4.4-17
叶型尺寸/mm	100×60	40×25；54×40；70×43	经济尺寸：90×40	40×20；30×15
毛　坯	钛合金模锻件	镍基合金模锻件	钛合金、镍基合金滚轧条料	Incone1600 轧制板条
设　备	卧式双头机床，2 台 3 000 A 电源	卧式双头机床，1 台 5 000 A 电源	叶片自动生产线中的 360°电解加工机床	SMH-3-50 卧式 3 头机床，1 台 10 000 A 电源
电解液	5% $NaClO_3$ + 3% NaCl 或 6% $NaNO_3$ + 2% NaCl	耐热合金、不锈钢：$NaNO_3$（30%～40%）	NaCl 或 $NaNO_3$	$NaNO_3$

续表 4.4-7

零件名称		中小型钛合金叶片	小型涡轮叶片	压气机叶片	超小型涡轮叶片
工艺参数	U/V	19	16	钛合金 > 20	16
	I/A	1 400			2 000
	i/A·cm^{-2}	约 24	100		100 ~ 200
	v/mm·min^{-1}	0.35 ~ 0.45	2.2	每片加工时间 4 min	2
	p/MPa	0.5	1.4 ~ 1.7	2.5	1.8
	Δ_0/mm	0.2	0.38		
	Δ_b/mm	0.25	0.25	0.25 ~ 0.50	
	t/℃	20 ~ 40	35 ~ 45		
流　场		侧流式	侧流式	反流式（轴向）	侧流式
加工结果		达到叶片最终要求，型面精度 0.25 mm	达到叶片最终要求，型面精度 0.25 mm	叶型实际厚度误差在 0.075 mm 之内，宽度误差亦为 0.075 mm，边缘减薄到 0.15 mm	达到叶片最后的要求
生产厂家		北京航空工艺研究所，新都机械厂	英国 R.R. 公司	英国 R.R. 公司	德国 AEG 公司

零件名称		大型汽轮机叶片	大型涡轮叶片	大型汽轮机叶片
图　例		图 4.4-14	图 4.4-28	图 4.4-29
叶型尺寸（长 × 宽）/mm		270 × 130	350 × 140	270 × 90
毛　坯		钛合金模锻件	镍基合金模锻件	不锈钢（2Cr13）方料
设　备		DJS – 20 卧式双头机床（中国）2 台 10 000 A 电源	SMH – 2 – 200 – 20 卧式双头机床（德国）1 台 20 000 A 电源	DJS – 20 卧式双头机床（中国）2 台 10 000 A 电源
电解液		6% $NaNO_3$ + 2% NaCl	$NaNO_3$	8% NaCl
工艺参数	U_1/V	18	20	16 ~ 17
	I/A	4 000	20 000	6 000 ~ 6 300
	i/A·cm^{-2}	11.8	40.8	25 ~ 26.2
	v/mm·min^{-1}	0.25 ~ 0.40		0.5
	p/MPa	0.6		0.7 ~ 0.8
	t/℃	27 ~ 30		24 ~ 27
流　场		侧流式	正流式（沿横截面）	侧流式
加工结果		完成型面尺寸加工，尚需后续手工抛光	达到叶片最终要求	完成型面尺寸加工，尚需后续手工抛光
生产厂家		北京航空工艺研究所	德国 AEG 公司	北京航空工艺研究所，杭州汽轮机厂

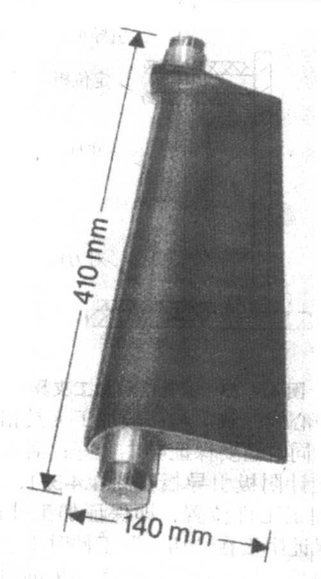


图 4.4-28　大型涡轮叶片

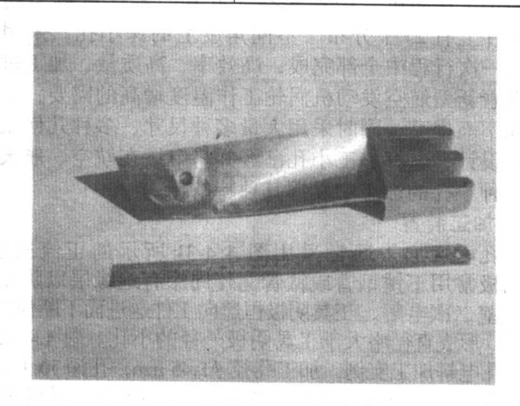


图 4.4-29　大型汽轮机叶片

如前所述，虽然近些年来叶片电解加工的发展较为迟缓，缺乏突破性的进展，但由于新型航空、航天推进器及汽轮机的发展，对难加工材料、特型、高精度的新型叶片，更需要采用电解加工，提出了更高的要求。而随着高科技的发展，电解加工技术近年有了新的突破（见第 5 章），在叶片加工上已显示出其实用价值和应用前景。随着新技术的成熟



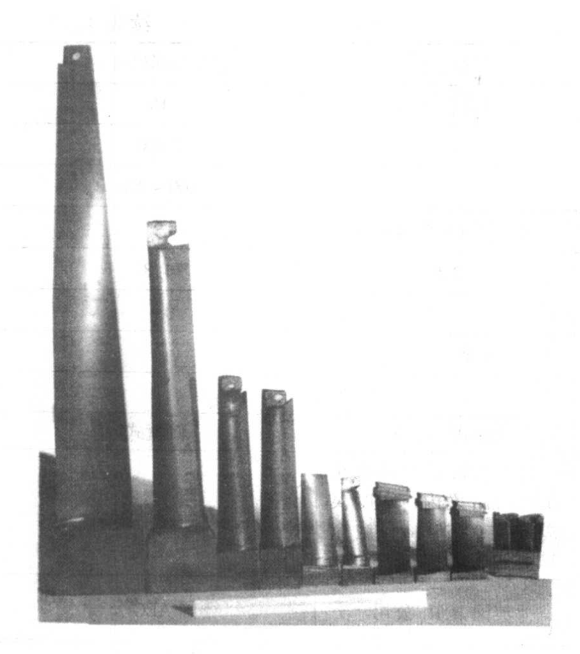


图 4.4-30　电解加工的汽轮机叶片系列

和应用，电解加工叶片又会得到进一步的发展，在叶片加工中将会进一步扩大其应用的领域。叶片始终是电解加工的最多应用领域。

4　深小孔、型孔电解加工

孔类电解加工，特别是深小孔及型孔加工，是电解加工的又一重要应用领域，本节将分别介绍其加工装置、阴极结构及工艺要点。

4.1　深小孔电解加工

对于用难加工材料，如高温耐热、高强度镍基合金、钴基合金制成的空心冷却涡轮叶片和导向器叶片，其上有许多深小孔，特别是呈多向不同角度分布的深小孔，甚至弯曲孔、截面变化的竹节孔等，用普通机械钻削方法特别困难，甚至不能加工；而用电火花、激光加工又有表面再铸层问题，且孔深也不能太大；采用电解方法，其加工效率高、表面质量好，特别是采用多孔同时加工方式，效果更加显著。如美国 JT9 发动机一级涡轮导流叶片，零件材料为镍基合金，叶片上有 25 个分布于不同角度上的深小孔，采用电解加工在一次行程中全部完成，高效率、高质量，加工过程稳定。随着新型航空发动机涡轮工作温度增高的需要，零件材料性能不断提高，同时采用大量多种尺寸、多种几何结构的冷却孔设计，电解加工小孔已经并将继续在航空、航天发动机上多种小孔的加工中发挥其独特的作用。

4.1.1　加工装置

小孔电解加工通常采用图 4.4-31 所示的正流式加工。工具阴极常用不锈钢管或钛管，外周涂有绝缘层以防止加工完的孔壁二次电解，工具阴极恒速向工件送进而不断使工件阳极溶解，形成直径略大于工具阴极外径的小孔。图 4.4-32 为典型深小孔电解加工实例，加工孔径 ϕ1.45 mm，孔深 70.1 mm。

深孔电解加工夹具结构如图 4.4-33 所示。阴极座安装在小孔电解机床的送进主轴上，工具阴极与阴极座的连接可以用弹簧夹头（适用于安装加工小孔的不锈钢管阴极），也可用低熔点合金浇注固定（适用于安装加工型孔的型管阴极，对多孔加工时多个阴极安装也可用低熔点合金浇注），则工具阴极可随机床送进主轴上下垂直运动。而加工夹具固定在机床工作台上，一般可有纵向、横向运动，以便调整夹具相对机床主轴的位置，从而保证工具阴极中心线与工件上

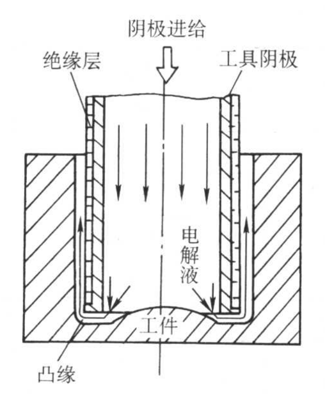


图 4.4-31　小孔电解加工示意图

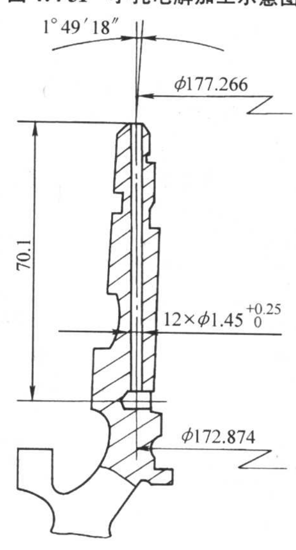


图 4.4-32　电解加工的涡轮后轴润滑油孔
（材料：Inco718 镍基合金）

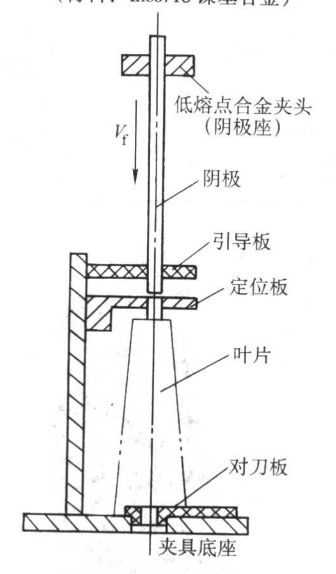


图 4.4-33　深孔电解加工夹具

将要加工孔的中心线一致。与一般加工夹具相同，要保证工件定位、夹紧，同时还要保证导电良好；而对于深孔电解用夹具，还必须设计阴极引导板（图 4.4-33），其上的引导孔保证阴极相对加工工件位置，即保证加工孔的中心位置精度；同时也可保证阴极在“切入”工件时不会偏摆振动。由于工具阴极细而长，如果没有阴极引导板的引导，则相对阴极座的固定点会发生严重偏摆振动。为了检查阴极中心与加



工孔中心是否一致以及阴极是否弯曲、偏斜，还需设计对刀板安装定位在夹具底座上，将阴极垂直向下运动，检验阴极端头是否与对刀板上的对刀孔位置一致。若有偏斜，则要查找原因：是机床主轴中心与夹具引导孔中心不一致，还是阴极本身已经偏斜，对此都要采取相应纠正措施。图 4.4-33 是典型的正流式加工用夹具，而在深孔或多孔加工时，为了保证加工过程更加稳定，则可以采用反流式加工，此时夹具更复杂一些，后面还将专门介绍。

4.1.2　工具阴极

(1) 阴极材料

通常小孔加工用工具阴极由不锈钢管制成；当加工孔径很小、或深小孔的深径比很大时，为避免电解液中的电解产物或杂质堵塞，有时还采用酸类电解液，则相应地需要选用耐酸蚀的钛合金管制造工具阴极。用此类阴极加工，其加工深小孔的深径比可以达到 180:1，孔径精度可以达到 ±0.025～±0.05 mm，在 25.4 mm 的深度上孔的偏斜量不大于 0.025 mm，表面粗糙度可以达到 R_a0.32～0.63 μm。该加工工艺已应用于镍、钴、钛、奥氏体不锈钢等高强度合金航空发动机轮盘、叶片上多种类型的孔加工，如平行孔、斜孔；且可同时加工多个深小孔。

(2) 几何结构及基本要求

对直孔加工，型管阴极的直线度有着严格要求，否则加工孔会产生偏斜，严重时还会产生短路。而对型管阴极的“加工刃”端，要有正确的几何形状和一定的尺寸精度；型管外径、内孔直径（或管壁厚度）根据所需加工孔径的大小和所选定的加工工艺参数而确定。以下就阴极型管端头几何结构（图 4.4-34）及相关尺寸进行介绍。

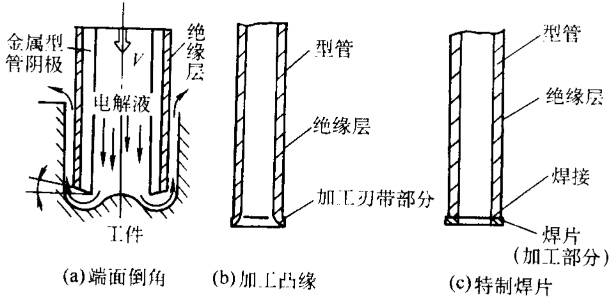


图 4.4-34　典型工具阴极结构示意图

1) 端面倒角（图 4.4-34a）　一般深小孔加工阴极端面都应仔细修整抛光。实践证明，一般倒角 10°较合适。此时在适当的进给速度条件下，侧面间隙（单面）约 0.15～0.20 mm，减去阴极单面涂层厚度约 0.05 mm，还有足够的间隙空间允许电解液顺畅通过。孔类电解加工的成形规律是：随进给速度加快而侧面加工间隙减小。对于确定的加工条件，即确定的进给速度和加工电流密度、确定的加工材料和电解液，则对应加工孔径、阴极管外径、内径（或壁厚）有着对应关系。图 4.4-35 就是一个范例，而图 4.4-36 则给出了相同条件下加工孔截面积与阴极管截面积的对应关系，其目的是为了保证导电需要。由图 4.4-35 和图 4.4-36，根据加工孔径，可以选择工艺条件和阴极型管的几何尺寸。

2) 端面制成加工凸缘（图 4.4-34b）　对于特别深的小孔加工，或希望绝缘涂层更厚一些、更牢固一些以确保绝缘涂层质量，则阴极型管一端要进行翻边而形成喇叭口，从而制成加工凸缘，凸缘的外径相当于上述阴极型管外径，加工侧面间隙将不用考虑包容绝缘层厚度而可以小一些。修整凸缘“加工刃带”的宽度，也可以影响侧面加工间隙的大小，即加工刃越宽，侧面间隙越大。根据加工孔径的大小、精度以及加工工艺条件以确定凸缘外径和加工刃带的宽度。

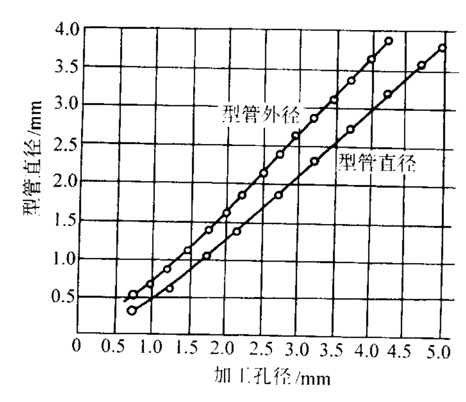


图 4.4-35　阴极型管直径与加工孔径的关系

工艺条件：绝缘层厚度 0.05 mm；进给速度：1.4 mm/min；加工电流密度：270 A/cm²；加工材料：镍基合金；电解液：酸类水溶液

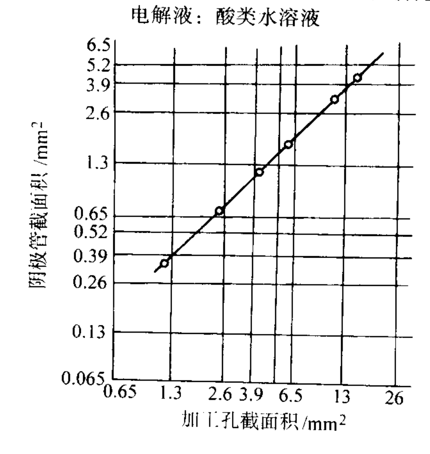


图 4.4-36　阴极型管截面积与加工孔截面积的关系

工艺条件同图 4.4-35

3) 端头焊片（图 4.4-34c）　对于圆孔加工可制成加工凸缘，但对于异型孔，如三角孔、方孔、扁孔等加工，采用一薄片，外形制成需加工的异型孔形状，而内孔则与阴极型管内径一致并进行钎焊。这样，阴极型管不影响加工形状，只起导电与供液作用；而加工孔的形状则由焊片形状决定。其加工成形规律与上述阴极端面制成加工凸缘的加工方式类似，只是凸缘改进为焊片。焊片的设计及制作将在型孔电解加工中以实例说明。

(3) 阴极绝缘涂层

保证阴极绝缘涂层质量，即要保证涂层均匀光滑并与管壁结合牢固，不允许涂层中有气孔或夹杂物，不允许漏电，是保证小孔加工质量的必要条件。否则，就会使加工孔偏斜、不圆或孔壁粗糙，甚至出现沟槽。因此，在加工前要仔细检查涂层质量，除目测检查外，还需在电解池中进行通电电解试验的严格检查，即将涂好绝缘层的阴极型管加工端用绝缘软膏（如真空密封泥）包住，将其和一块金属片放入一定浓度、例如 15% 的 NaCl 水溶液中，金属片接直流电源正极，阴极型管接直流电源负极，注意阴极型管和金属片保持一定距离，接通电源，如果涂层有气孔，就会在该处冒出一串气泡。仔细检查涂层各处，如全长上均无气泡产生，则鉴定阴极涂层合格。为严格标准，常用较高的直流电源电压，如 16～24 V 做检查时的电压。

常用绝缘涂层材料有高温陶瓷涂料和环氧塑料涂层。高温陶瓷涂层可以涂得薄而致密，结合牢固，通常可达 0.02～0.05 mm 薄层，是端面倒角型管阴极的理想涂层。但其配制及高温烧结固化过程相当复杂，故在允许涂层较厚条件下（涂层厚度在 0.3 mm 以上）使用环氧树脂、环氧塑料类型的涂层。为了增加结合牢度，型管外周需进行喷砂及除油，有

时还用玻璃纤维缠绕后再涂环氧涂料。由于涂层不能太薄，故环氧涂层只适用于有加工凸缘或焊片类型的阴极。

为了保证涂层质量，特别要保证工作端头的绝缘涂层不会因受电解液冲刷而剥落，也不因端头加工区温度升降的变化而使涂层松动，在阴极管壁厚度及加工孔径允许的条件下，还可以采用复合涂层（图 4.4-37）。其中需在靠近加工凸缘端阴极管上加工一段凹槽，可在靠近加工区增加涂层厚度。图中所示的塑胶底漆与阴极管有较高的结合力，而在底漆上再涂的塑胶不易形成气孔且与底漆结合牢固，还可以形成一定厚度。这样就可以根据需要而涂覆不同厚度的涂层。

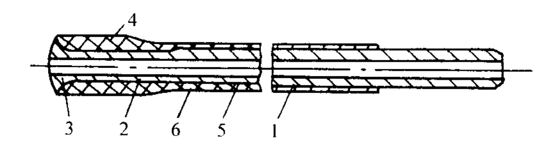


图 4.4-37 阴极复合涂层示意图
1—阴极管；2—特别凹槽；3—加工凸缘；
4—加厚涂层；5—塑胶底漆；6—塑胶涂层

（4）阴极导向及防振结构

在小孔加工过程，由于电解液的压力作用，当加工到一定深度时，细长的阴极会产生振动，而且随着加工深度的增加，其振动也可能增加。因为振动，可能引起阴极送进方向偏斜，从而使加工孔也偏斜。严重时，孔壁还会出现波纹。为了防止振动以保证导向精度，在阴极结构上可以采取一些防振措施。

1）提高阴极导向精度有利于减小阴极振动。如图 4.4-33 所示电解夹具，必须保证引导板上阴极引导孔的滑动配合精度，而且导向套要耐磨，如此可保证阴极精密导向，防止由于导向孔的过大间隙而使阴极产生振动。

2）在阴极上设计某些防振结构。如图 4.4-38 所示为最简单的一种防振结构，在阴极绝缘涂层 1 外周再加一个活动配合的外套 2，它在加工过程中既可实现阴极相对加工孔中心的导向定位，也可防止阴极振动；同时还保证阴极绝缘层 1 不会接触孔壁而产生摩擦。而图 4.4-39 又是另一种防振结构，有一股电解液从阴极侧向孔 1 喷出从而使阴极受到一个反推力，则阴极被压紧在孔壁另一侧上，如此防止阴极振动。图中外套 2 粘结在阴极型管上且由绝缘材料制成，以防止阴极与工件短路。图 4.4-40 则是一种比较复杂的防振结构，它靠簧片 4 的作用将阴极管压在孔壁另一侧，从而防止阴极振动。同样外套 2 粘结固定在阴极管 1 上，且必须绝缘，以防阴极与工件短路。而且外套 2 上开有若干条与加工孔中心线一致的纵向槽，以保证电解液流通。在前述两种结构中的外套 2 也都一样需开纵向槽。

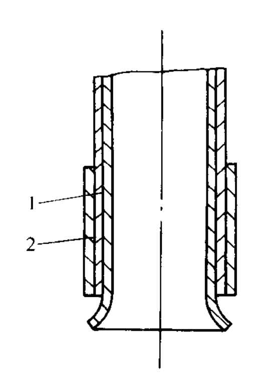


图 4.4-38 简单的防振结构
1—绝缘涂层；2—外套

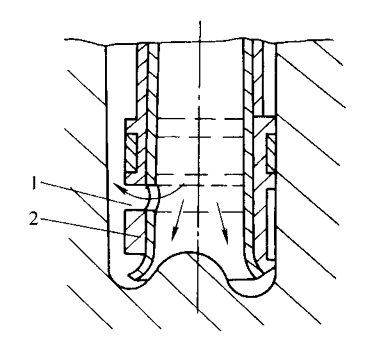


图 4.4-39 液压防振结构
1—侧向出液孔；2—外套

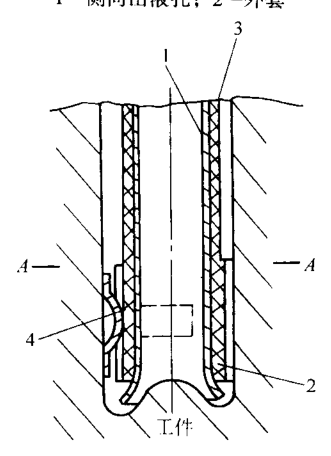


图 4.4-40 簧片防振结构
1—阴极管；2—外套；3—绝缘涂层；4—簧片

4.1.3 几个主要工艺问题

（1）恒参数控制策略

为了得到较高的加工孔径精度，并保证在孔深全长上孔径尺寸一致，深小孔电解加工常采用恒参数控制策略，即在整个加工过程控制加工电压、进给速度、电解液温度和输液压力保持恒定；同时还要定时检测电解液的组成及浓度是否有变化，如有改变则需及时补充、调整某些成分以保持其组成和浓度不变。通常加工电压在 8 ~ 15 V、进给速度在 1 ~ 5 mm/min、电解液温度在 25 ~ 38℃范围内选取，确定这些参数的主要依据是工件材料的电解加工性能和电解液的组成。电解液供液压力则根据加工孔深度在 0.5 ~ 1.5 MPa 范围内选取并控制为某一常压，加工孔的深度越大，所需供液压力越高。

（2）监控加工电流，判断并控制加工过程

为论述问题的方便，将图 4.4-41 所示带加工凸缘的阴极加工孔的有关成形规律的计算式重列如下：

在平衡加工状态，关系式 $v_a = v$ 成立，且有

$$U_R = U - \delta E$$

$$i = \kappa U_R / \Delta_b$$

$$v_a = \eta\omega i$$

$$\Delta_b = \eta\omega\kappa U_R / v$$

若再考虑温度和气泡率对电导率的影响，则有

$$\kappa = \kappa_0[1 + \xi(T - T_0)](1 - \beta)^n$$

对于图 4.4-41 所示孔加工的侧面间隙，有

$$\Delta_s = [\Delta_b(2b + \Delta_b)]^{1/2}$$

式中，Δ_b 为阴极加工端面平衡间隙；Δ_s 为加工孔侧面平衡间隙；b 为加工凸缘高度（图 4.4-41）。

显见，当实行恒参数控制策略时，对应上列各式中参数均保持为常数，则其中电流密度 i 也为常数；而又因为阴极加工面积固定，故在全加工过程总加工电流也恒定不变。在



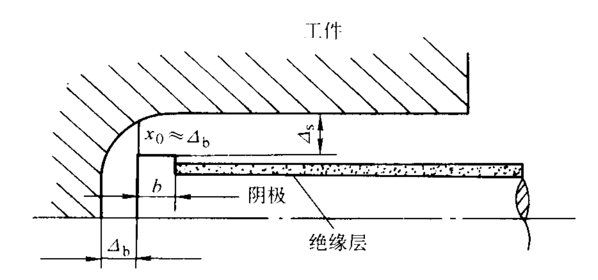


图 4.4-41 带加工凸缘阴极的加工间隙模型

深小孔电解加工中，应特别注意观察加工电流以判断加工过程是否正常，如果加工过程中电流突然变大或变小，均说明加工过程异常。例如，当阴极加工面上沉积物增多，可能使电流略有减小；而随着加工进行，电解液温度略有升高，则电流也会增加；如果阴极绝缘涂层剥落、则工作电流显著增加；如果加工中电流摆动，则可能阴极振动、或进给不平稳，有机械爬行现象等。一般讲，当电流变化在 2% ~ 4% 范围内，属正常稳定加工；其中变化越小，加工孔径精度越高；如果有突变，或超过 4%上限值，则应仔细检查以排除故障。

除了常用的恒参数控制策略外，还可在恒速进给条件下，依据加工电流的变化而适当改变加工电压，即进行恒电流控制。由于加工面积不变，则恒电流控制也实现了恒电流密度控制。这一控制方案是基于上述方程组所表达的各参数对侧面平衡间隙的影响关系，例如，当温度升高时，电导率 κ 也升高，则电流密度 i 增大；而为了保持 i 不变，相应地控制电压 U 减小，则 U_R 减小而控制 i 保持不变；由于进给速度 v 不变，故平衡间隙 Δ_b 以致侧向间隙 Δ_s 均保持不变，则加工孔径尺寸保持一致。类似地，也可在恒电压前提条件下，相应于电流的变化调整进给速度，实现进给速度的自适应控制。例如当 κ 增大时，则 i 增大（因为保持 U 恒定）；而相应地使进给速度 v 提高，则仍可保持 Δ_b 不变，由此 Δ_s 也保持不变，加工精度得到保证。

(3) 电解液应该具有溶解电解产物的功能

深小孔电解加工，可采用中性盐水溶液，如 NaCl、$NaNO_3$、$NaClO_3$ 水溶液或其中两种以上按不同比例组成的复合电解液，其选择原则与一般电解加工电解液选择原则相同，主要依据是工件材料的电解加工特性以及加工精度要求。要指出的是，由于深小孔阴极内径小且加工侧面间隙窄而深，故要求电解液特别洁净，不仅对电解液的过滤要求特别高，还特别要求电解液具有溶解电解产物的功能，以防止电解产物在阴极或孔壁表面上沉积，防止电解产物阻塞或局部阻塞。故在中性盐水溶液中要加入某些添加剂，如 EDTA（乙二胺四乙酸）、某些有机酸的盐类（如酒石酸钠、柠檬酸钠）等金属络合物，其添加量只要 1% ~ 2%就可满足要求。但要注意，这些添加物在加工过程中会有损耗，故要定期检查、定期添加。

选用酸类电解液，如 10%的 H_2SO_4 水溶液、14%的 HCl 水溶液，能从加工精度、表面质量、溶解产物以防止沉积等各方面满足深小孔加工的要求，故在加工精度要求更高、或加工孔的深径比更大的场合，常常选用酸类电解液。但这类电解液随加工进行，其中的金属离子含量不断增加以及溶液 pH 值的改变，都会影响加工性能，故要定期添加新鲜酸类溶液或到时全部更新，它们不像 NaCl 电解液那样可以长期循环使用，至少要定期以一定量新电解液更新一定量旧电解液。

(4) 反流式加工有利于提高深小孔、多孔电解加工的稳定性

实践证明，采用反流式加工对于提高孔类电解加工、特别是深小孔、多孔加工的稳定性具有显著效果，但是其夹具结构更加复杂，需要设计进液腔及电解液密封（图 4.4-42）。电解液由进液管输入进液腔，再经由阴极外周与加工孔壁之间形成的侧面间隙，输入到阴极端面加工间隙而实现电解加工，最后经由阴极管内孔流出。流场理论分析并经试验测试证明，反流式电解加工特别能改善流场的均匀、稳定性：首先，在进液腔内电解液压力、流速得到均衡、稳定，从而能保证在均匀、稳定的高压力、高流速条件下将电解液输入各小孔加工区，这对于保证深小孔、多小孔加工过程中的流场均衡、稳定特别重要。由此，才能保证全加工过程稳定、可靠，从而能稳定达到高加工精度之目的。

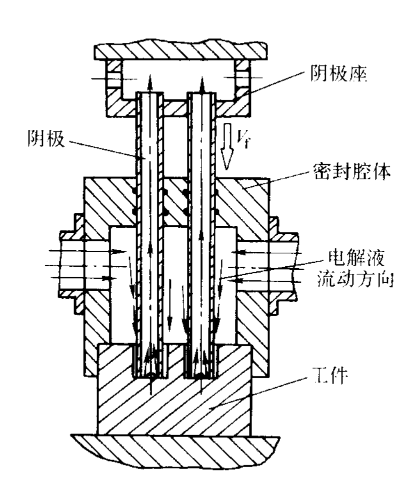


图 4.4-42 反流式电解加工多孔

4.2 型孔电解加工

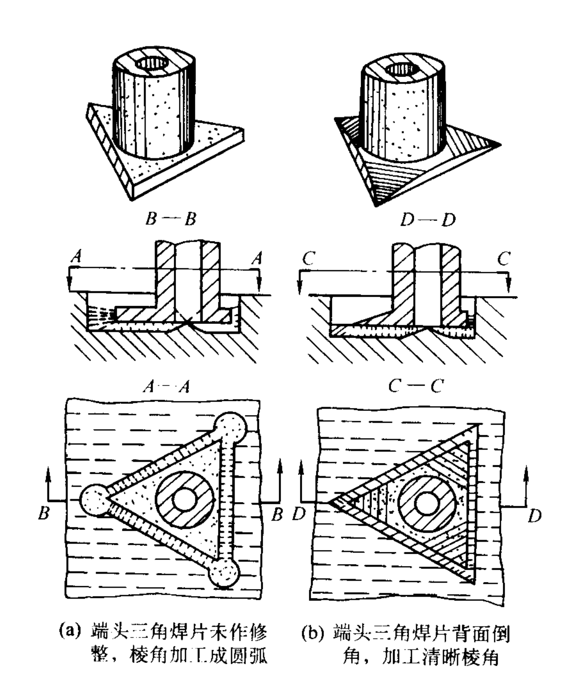
型孔、特别在深型孔、复杂型孔的加工中，电解加工已显示其突出优点，占有其独特的应用地位。表 4.4-8 给出了几种典型应用实例，其中加工材料为前苏联牌号，与中国材料成分对应为：X – Cr、H – Ni、M – Mn、ю – Al、A – 优级、СЧ – 灰口铁、ЭИ – 高温耐热合金钢；表面光洁度 6 级（前苏联标准）相当于 R_a1.25 ~ 2.5 μm，7 级相当于 R_a0.63 ~ 1.35 μm。

前述深小孔电解加工中有关工具阴极设计制造、主要工艺问题及解决措施，都适用于型孔电解加工。但型孔电解加工的阴极问题又更有特殊性，特别对带棱角的、或形状复杂的型孔更难加工，更要采取特殊措施加以解决。

对于形状简单的型孔，可采用相应型管外涂绝缘涂层的型管阴极（参见图 4.4-34a）进行加工，其加工端部要修磨成 10°倒角。而型管的制造则由相应尺寸的圆管分几次逐步拉伸成形。而对于带棱角的、形状复杂的型孔加工则阴极需采用图 4.4-34c 所示的特制焊片阴极结构：阴极本体采用圆管或型管；而加工端头的焊片则根据型孔几何结构、加工间隙大小而设计制造；如果型孔几何形状接近圆孔，如图 4.4-43 所示的等边三角型孔加工，则阴极本体可选用圆管；而如果型孔几何形状与圆孔相差甚远，则阴极本体最好也用拉伸型管，如此则加工区流场比较均匀。如图 4.4-44 所示的型孔，就是采用如图 4.4-45 所示的型管阴极本体、并在加工端头焊接成型的阴极薄片（厚 0.3 ~ 0.5 mm，外形按型孔尺寸并考虑加工间隙而修整），整体结构如图 4.4-34c 所示。对于带棱角的型孔加工，要注意修整焊接片（参见图 4.4-43）。其中图 4.4-43a 焊接片周边为直边，则由于三角尖端电力线集中而使棱角加工成圆弧；而图 4.4-43b 则将焊片背部进行倒角处理，用此阴极加工，则得到棱角清晰的型孔。

表 4.4-8　型孔电解加工范例

孔　型	孔的尺寸 a/mm	加工深度/mm	加工材料	材料硬度 HRC	阴极进给速度 /mm·min⁻¹	电流 /A	电压 /V	电解液压力 /0.1 MPa	背压 /0.1 MPa	电解液流速 /m·s⁻¹	侧向间隙/mm	a 的偏差/mm	表面粗糙度 /μm
	15	120	3X13	40~42	3.7	320	20	12	6	10	1.0	±0.05	1.6
	15	120	0XH3M	40~42	1.8	170	15	5	2.5	6	1.0	±0.1	0.8
	3	42	ЭИ867		1.4	Ⅰ-72 Ⅱ-43	16	15	3	14	0.5	±0.05	0.8
	6	40	CЧ28	56~58	1.8	100	20	5	2	7	1.0	±0.1	1.6
	15	120	38XMЮA	40~42	3.0	320	20	8	4	8	1.0	±0.1	1.6
	10	20	0XH3M	40~42	1.8	70	20	5	2	7	1.0	±0.1	0.8
	5	厚度 1 mm 的薄板，一组 20 件	钨		1.0	20	24	5	2	7	0.5	±0.1	0.8



(a) 端头三角焊片未作修整，棱角加工成圆弧　(b) 端头三角焊片背面倒角，加工清晰棱角

图 4.4-43　三角型孔的电解加工

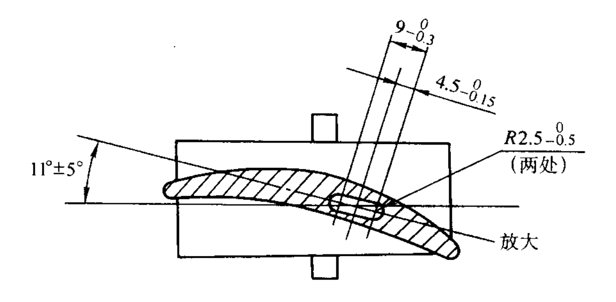


图 4.4-44　某型航空发动机导向叶片中的扁孔
（孔深 260 mm，通孔）

随着电解加工技术的发展，脉冲电流电解加工在型孔、特别是在深型孔、复杂型孔和深小孔（参见图 4.4-32）的加工中发挥重要作用。其原因可以归纳为：

(1) 脉冲电流电解加工的集中蚀除能力高、切断间隙小，有利于提高成形精度，特别有利于清棱清角的加工；

(2) 压力波的扰动作用，有利于深孔加工时排除电解产物；

(3) 必要时，可以在直流脉冲电源基础上构造一定周期的反向脉冲（反向幅值比正向幅值小些），有利于清除在阴极加工面上沉积的电解产物。

特别是近十余年来高频、窄脉冲电流电解加工的出现，对于深度不大的型孔、圆孔加工，甚至型管外周不绝缘也能

获得很高的成形精度。可以预计，脉冲电流电解加工在深小孔、型孔加工中将有广泛的应用前景。

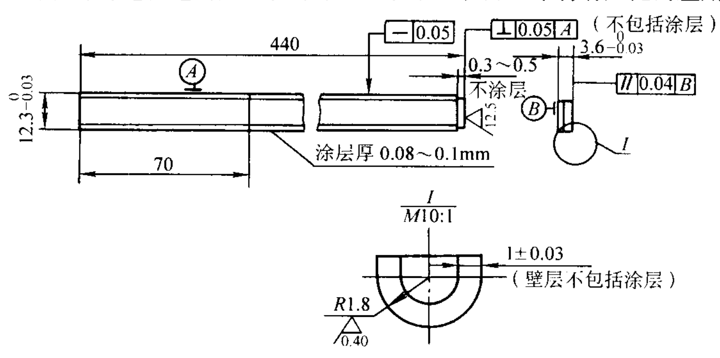


图 4.4-45 加工扁孔用的型管阴极本体

5 枪、炮管膛线电解加工

5.1 膛线电解加工的特点和分类

枪、炮管是我国在工业生产中首先采用电解加工的零件，它开辟了我国电解加工应用的先例。与传统的膛线加工工艺相比，电解加工具有质量高、效率高、经济效果好的特点。经过生产实践的考验，膛线加工工艺已经定型，成为枪、炮制造中的重要工艺手段，并且随着工艺技术的不断完善，阴极结构的不断创新，生产应用面在进一步扩大。

5.1.1 膛线电解加工的特点

膛线是在枪炮内膛表面加工出的一组从弹膛到炮口贯穿始终的均布于圆周方向的螺旋凹槽，其断面多为矩形，如图 4.4-46 所示。凹入部分称为阴线，突起部分称为阳线，膛线的螺旋升角称为缠角。通常，枪管膛线的深度约为其口径的 1.4%～2%，炮管膛线的深度约为其口径的 1%～1.5%。炮管的阳线表面粗糙度为 R_a0.4 μm，阴线表面粗糙度 R_a 要求达到 0.8 μm。

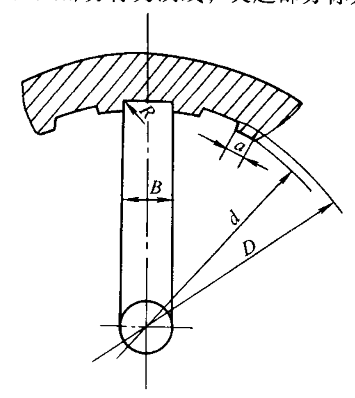


图 4.4-46 炮管膛线剖面图

a—阳线宽度；*B*—阴线宽度；*d*—阳线直径；*D*—阴线直径；*R*—根部圆弧半径

通常膛线电解加工包括阳线的电解抛光和阴线（膛线）的电解成形加工两道工序。传统的膛线机械加工方法有两种，大口径炮管膛线采用拉线法，在拉线机上用多把拉刀分组进行，才能完成全部膛线的加工。

小口径枪管膛线采用挤线法，挤线法是在专用设备上用冲头成形，冲头制造困难，为了保证在挤制膛线过程中产生均匀的塑性变形，原材料需采用等径圆钢，挤成后再按枪管外形去除多余材料，费工费时。为了挤加工顺利，需经校正→着铜→镀铜→镀铅→去铅→去铜→回火，辅助工序多。

电解加工枪炮管膛线，在加工膛线的专用电解加工机床上进行，加工时枪、炮管接直流电源正极，工具阴极接负极，从阴极中喷出高压电解液，阴极从弹膛移动到枪炮口。

电解加工枪炮管膛线与机械加工膛线比较具有以下优点：

1）电解加工仅需要一个阴极，一次成形，生产率高，工序简单；

2）工具阴极不消耗，节省了大量昂贵的拉刀或冲头；

3）表面质量好，无飞边毛刺，无残余应力，表面粗糙度优于拉制和挤制；

4）膛线加工可以安排在热处理后进行，从根本上解决了枪炮管加工后的校直问题。

5.1.2 膛线电解加工的分类

表 4.4-9 列出了膛线电解加工的类型、阴极的结构形式及特点。

表 4.4-9 膛线电解加工的分类

<table>
<tr><th>分类</th><th colspan="2">类 型</th><th>特 点</th><th>应用状况/范围</th></tr>
<tr><td rowspan="3">按膛线类型</td><td colspan="2">等齐膛线</td><td>缠角不变</td><td>采用电解加工三十多年</td></tr>
<tr><td colspan="2">渐速膛线</td><td>变缠角</td><td rowspan="2">近十年开始采用电解加工工艺</td></tr>
<tr><td colspan="2">混合膛线</td><td>由二段或三段不同缠角的膛线组成</td></tr>
<tr><td rowspan="3">按阴极结构和加工方式</td><td colspan="2">固定式阴极加工</td><td>1）属全型复制加工类型
2）设备简单，但电源容量大
3）采用与炮管等长的柱形阴极，但刚性弱、制造难度大
4）加工时间隙不断扩大且沿阴极长度流场分布不均，电解液进出口温差变化大，加工精度较差</td><td>1）只适用于小口径，浅膛线，短炮管的加工
2）可以加工渐速膛线</td></tr>
<tr><td rowspan="2">移动式阴极</td><td>推式</td><td rowspan="2">1）推式阴极的流场为收敛形，但是进给不如拉式平稳
2）不论拉式还是推式，按阴极体的形状有圆柱形、圆锥形及片状阴极
3）可采用小间隙加工并保持间隙基本不变，获得较高的加工精度和良好的表面粗糙度</td><td rowspan="2">根据产品结构特点在不能进行拉式加工的情况下选择推式阴极；对于精度要求高，根部圆角要求小的膛线采用圆锥阴极</td></tr>
<tr><td>拉式</td></tr>
</table>

续表 4.4-9

分类	类　　型	特　　点	应用状况/范围
按控制方式	控制时间	给定初始加工电流，控制加工时间	固定式阴极加工
	控制电压	全程按电压曲线控制	炮管膛线
	混合控制电流和电压	进出口控制电压，中间段控制电流	炮管膛线
按控制手段	人工	设备简单，操作工人须集中精力	等齐膛线
	计算机控制阴极运动轨迹和加工参数	可以达到精确控制的目的	等齐渐速膛线、混合膛线

近年来，新型火炮设计中提出的炮管渐速膛线和混合膛线，成为新产品研制的技术关键。大缠角深线型的渐速膛线和混合膛线的加工不可能沿用传统电解加工的阴极设计方案和控制方法。为此，研制了单边楔形锥体移动式加工阴极，采用计算机控制膛线阴极运动轨迹和加工参数，并且使上述两项控制同步进行，实现了混合膛线炮管的加工，使火炮射速、精度及寿命均有明显提高。微机控制电解加工，使传统电解加工的优势更加明显，并且赋予电解加工新的特点，使计算机控制和无应力电解加工相结合，有利于拓宽新型炮管膛线的设计思路，也有利于提高膛线加工的稳定性和加工柔性。

炮管膛线电解加工属于最终成形精加工，在满足成形精度、表面质量要求的同时，还希望有尽可能高的加工效率，因此对电解液及工艺参数的选择、阴极结构的合理设计等方面也都提出了较高的要求。

5.2 膛线电解加工工艺

5.2.1 工具阴极的结构形式及工艺特点

电解加工膛线工具阴极是一次成形的工具阴极，取代了多组拉刀。阴极的结构形式、流场设计、绝缘材料的镶嵌和工作齿的结构、尺寸等是影响炮管膛线表面质量和成形精度最重要的因素，因此阴极结构是该工艺的技术核心所在，不同的阴极结构决定了不同的运动方式和采用不同的加工参数，其成形过程和加工效果也因此不同。

阴极结构主要由阴极本体、引导支撑和电解液流道三部分组成，不同类型的阴极，首先是本体部分的结构不同。

1）阴极体为圆柱形的阴极。圆柱形阴极的结构如图4.4-47所示。阴极工作部分为圆柱形，阴极绝缘条的数目、缠角与工件膛线的条数、缠角相同，后引导套、出液的导流套与阴极工作部分连接段开有相应的螺旋槽，供导引电解液，使加工时的流场趋于均匀稳定。圆柱形阴极加工时，由于初始加工间隙小于成形处间隙，流场处于扩散状态，这对保证加工精度是不利的，但因膛线加工时常使用较高的电解液压力，也能保证最后成形部分有足够的流速；在各项参数合适情况下，表面粗糙度可达 $R_a0.8\ \mu m$；采用圆柱形阴极加工的根部圆角较大，一般为 0.7～0.9 mm，不过，这对于提高炮管的寿命却正好有利。

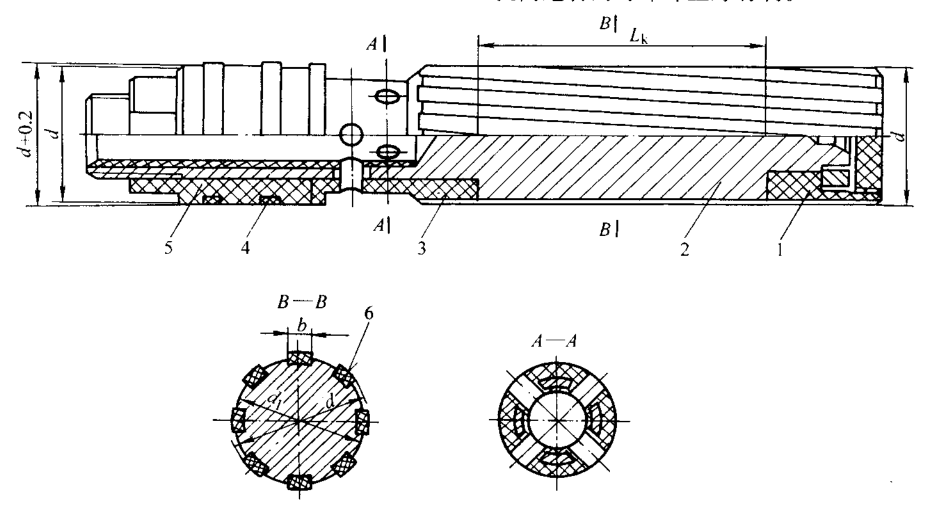


图 4.4-47　圆柱形阴极结构

1—后引导套；2—阴极体；3—出液套；4—密封圈；5—前引导套；6—绝缘片

由于圆柱形阴极制造较为简单、加工过程稳定，不易发生短路，因此该种结构阴极仍在一般中、小口径炮管膛线加工中使用。

2）阴极体为圆锥形的阴极及复合式阴极　图4.4-48所示为一种圆锥形阴极结构。圆锥形阴极是在圆柱形阴极基础上发展起来的，旨在减小膛线根部圆角半径 R 的一种结构形式。

阴极工作部分为全锥体，由于加工过程中，随着阴极做轴向送进时，工作齿还有一个径向的进给，加工过程中有利于维持加工间隙在径向保持不变（$\Delta=\Delta_0$），则有利于形成均匀的流场和电场；在相同初始间隙条件下，与采用圆柱形阴极加工的结果相比，可以获得较小的膛线根部圆角，一般在 0.5～0.7 mm 之间。

要使根部圆角在 $R0.3～0.5$ mm 范围内，采用上述锥体阴极也难以达到要求。经过试验，在上述锥体阴极工作部分的后端，增设一个修正圈，即可构成复合式锥体修正阴极结构。此修正圈的外径大于阳线直径，沿阴极的长度方向，工作齿部分与绝缘片部分有一交点，交点以后的工作齿部分伸入膛线内部，其侧面需绝缘。这种阴极成为移动式锥体跟踪阴极，增设的修正圈可以使炮管根部圆角大大减小。但由于其结构复杂，加工有一定难度，对于允许有较大根部圆角的一般膛线，这种阴极应用得不多。



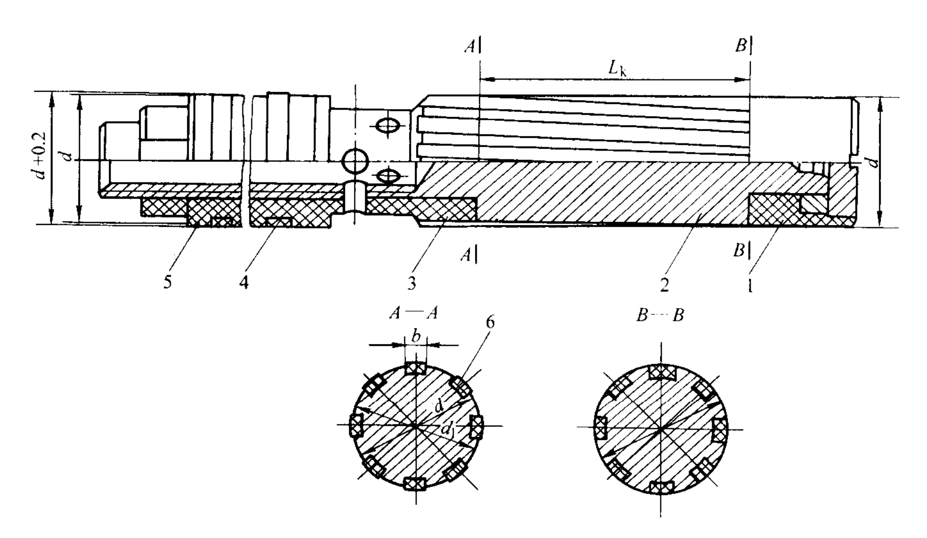


图 4.4-48 圆锥形阴极结构

1—后引导套；2—阴极体；3—出液套；4—密封圈；5—前引导套；6—绝缘片

用锥体修正阴极，采用以 $NaNO_3$ 为主的复合电解液，在一定的电流密度范围内可以加工出 $R0.3\sim0.4$ mm 根部圆角的炮管膛线，表面质量也较好。

圆锥体阴极的长度和工作齿角度是影响线型的关键因素。加工缠角不变的等齐段膛线时，为提高加工效率，工作部分可以设计得较长。但要加工变缠角的渐速膛线，要想得到理想状况的线型，不管是采用机械拉削还是采用电解加工，其拉刀刀具或阴极的工作齿（即阴极工作部分）越短越好，因为刀具和阴极在按弹道方程走缠角时是旋转的，切削刃的理想情况是一条线。电解加工时，阴极过长影响线型精度，阴极太短不仅加工效率低，还由于电解液在加工区内流程短，导流效果不好，易产生流痕，加工表面质量差。因而在保证线型精度允许的公差范围内，为了得到一定的加工效率，优选阴极工作段长度和工作面的每段宽度至关重要。

3）三面进给式锥体阴极　对炮管口径大、线型深的火炮膛线加工采用锥体跟踪式阴极，阴极侧面需要绝缘，制造麻烦，使用过程中绝缘层易脱落。在设计阴极时，确定阴极体工作部分的圆锥面与圆柱面的相贯线位置和绝缘片的厚度都是设计阴极的难点，往往要经过反复试验才能最后确定。为了保证线型质量和较小的根部圆角，提出了三面进给式锥体阴极结构，该种形式的阴极是保证大口径炮管深线型膛线加工精度的有效措施。其结构如图 4.4-49 所示。

这种阴极的工作齿的三个面都是工作面，加工时随着阴极轴向送进，工作齿的三个面都进给，工作齿的正面作径向进给，工作齿的两个侧面向膛线的宽度方向进给。考虑到随着工作齿的宽度增加，流场呈发散状，在工作齿分段设有增液槽，及时补充后段间隙的电解液流量。三面进给式锥体阴极的结构可以保证加工时电流密度、流场分布比较均匀合理。在结构尺寸设计合理的情况下，使用寿命长，生产率高，尺寸精度容易得到保证；但是阴极制造更为困难，因此大口径、线型深至 2 mm 以上的炮管膛线才采用三面进给式阴极，这是目前比较合理的选择。

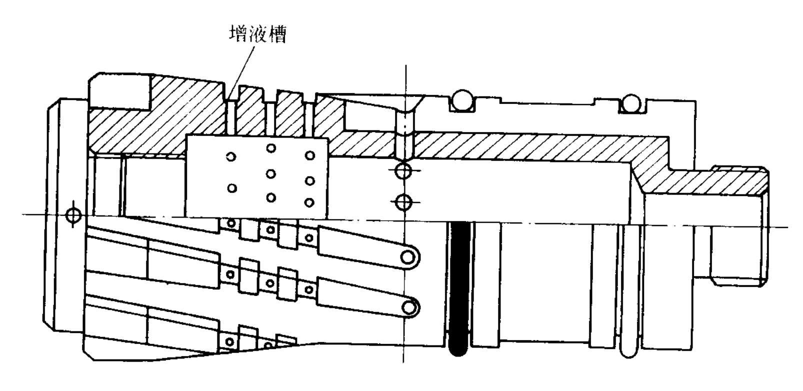


图 4.4-49 三面进给式锥体阴极结构

5.2.2 电解液及工艺参数

由于枪炮管材料多为铁基合金，如 $30CrNi_2MoVA$ 等材料，热处理 HB270～336，其金相组织主要为均匀的索氏体，这是电化学均匀溶解应具备的必要条件。实践证明，采用 NaCl 电解液加工枪炮管膛线是合适的，可以得到良好的表面质量，且加工效率高，在较大的工艺参数范围内电流效率接近 100%。虽然 NaCl 电解液的杂散腐蚀较严重，按照炮管膛线加工的特点，在阴极设计上采取了在加工区与后引导间的密封措施，对于膛线根部圆角要求不高的炮管，可以满足加工精度要求。从 NaCl 电解液电极反应机理来分析，电解液基本不损耗，电解液成分稳定，价廉，安全可靠。因此 NaCl 电解液仍是炮管膛线电解加工最常用的一种电解液。

但是对于要求根部圆角 $R\,0.3\sim0.5$ mm 的枪炮膛线，采用 NaCl 电解液加工达不到设计要求，除需设计移动式锥体跟踪特殊阴极结构外，还要选择非线性电解液，以缩小加工间隙，提高复制精度，使根部圆角达到设计要求。采用 $NaNO_3$ 电解液可以使加工的炮管根部圆角保持在合格的范围内，但 $NaNO_3$ 电解液对流场分布十分敏感，间隙较小时工件表面常有流痕产生，在 $NaNO_3$ 电解液中加入 ClO_3^- 等其他离子，成为以 $NaNO_3$ 为主的复合电解液，不仅可显著提高

电流效率，而且可以得到良好的表面质量，根部圆角可达到 $R0.3\sim0.5$ mm。

除了采用合适的电解液外，选择合理的加工参数，制定最佳工艺规范是获得良好表面质量，取得最佳经济效果的必要条件。其中最重要的是保证电解液流速、电流密度和相匹配的进给速度，以得到合理的加工间隙。NaCl 电解液的温度变化在 15～55℃等较大范围内对枪炮管加工表面质量无明显影响，因此加工时对温度不必要进行严格控制，但考虑到温度太高时会使阴极的绝缘条发生膨胀，影响前后引导与炮管阳线的间隙配合，一般应控制在 40℃以下。

以下列出枪、炮管膛线电解加工常用工艺参数：

电解液成分：10%～15%NaCl 水溶液；

电解液温度：40℃以下；

电解液压力：1.5～2.0 MPa；

电流密度：10～30 A/cm^2；

阴极进给速度：50～200 mm/min。

加工混合膛线和大口径、线型较深的炮管膛线时，常选用较低的阴极进给速度，加工中小口径炮管较浅的膛线可选用较高的阴极进给速度。阴极的进给速度还取决于阴极结构形式，合适的阴极进给速度的选取是工艺参数的核心，在确定了阴极进给速度后就可计算出加工电流。

5.3 膛线电解加工新技术的应用实例

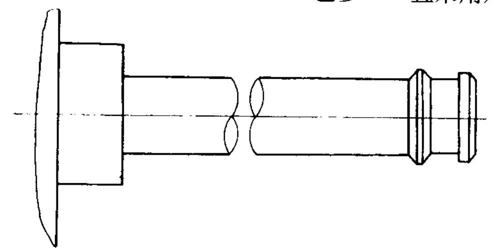
炮管膛线中，最难加工的是等齐膛线和渐速膛线组成的混合膛线，由于渐速膛线段的缠角是不断变化的，为保证线型，如果采用拉线法成形，拉刀设计必须很短，因此需要采用多组拉刀，分多次拉削，不仅加工效率低，而且拉刀在不等齐段作非匀速运动，受力不均匀，易发生抖动，切削刃易损坏，切削波纹重，加工质量差，难以满足较大批量的生产。为此，美国、俄罗斯和我国都相继研究应用电解加工方法解决混合膛线的加工问题。所用的阴极结构、加工工艺参数的选取都必须既考虑等齐段膛线的要求，又要保证渐速段的加工质量。本节以由三段缠角不同的膛线（其中一段为渐速膛线）组成的混合膛线为例，就阴极结构设计、膛线轨迹与加工参数的控制作一简要说明。

5.3.1 整体式阴极固定加工

采用与炮管等长的阴极，阴极工作面与炮管总长的膛线完全一致，直径方向留有一定间隙量。加工时阴极全部放入炮管中，控制一定的通电时间。该方案有以下特点：①设备简单：不需要带有微机或数控系统的电解机床，只需制作一个固定加工装置即可。②需要有较大容量的电流，如 3 m 长的一般炮管膛线，固定加工时间 40 min，电流值达 10 000 A 之多。③阴极制造十分困难：要有能加工 3 m 以上的变缠角的切削机床，由于阴极细而长，阴极的精度和形位公差都难以保证。另外，绝缘条的镶嵌或绝缘材料的涂覆也都十分困难。④工艺尺寸难以控制：在加工过程中，由于受阴极整个长度上电解液压差、温差、电解产物含量、阴极析氢量不均等多种因素的影响，溶液的电导率和流场状态变化较大，易造成进出口、前后段尺寸不一致，加工精度较难以保证。

5.3.2 片状阴极移动式加工

片状阴极的结构如图 4.4-50 所示。该阴极工作面为一厚约 1 mm 的工作齿，其余部分为前引导和后引导。加工时由微机控制阴极按照炮管膛线弹道方程运动，可以加工出一条完整的混合膛线。如美国 Anocut 工程部用片状阴极加工出 7.62 mm和 20 mm 枪管膛线，所采用的工艺参数见表 4.4-10。片状阴极结构简单，制造容易，对于短膛线加工线型好，复制精度高，但加工效率低，一般加工速度 < 5 mm/min。片状阴极加工对机床进给系统和供液系统要求高，由于加工面积特别小，容易受机床进给不稳定或流态发生变化的影响，因此容易在加工长膛线时产生横向和纵向波纹，造成线型精度和表面质量降低。因此，对于 3 m 以上的炮管混合膛线不适宜采用片状阴极加工。



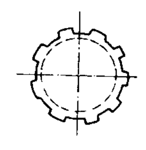


图 4.4-50 片状移动式阴极结构

表 4.4-10 美国 Anocut 工程部的 20 mm 枪管膛线电解加工工艺参数

试件号	加工电压/V	加工电流/A	阴极进给速度/$mm\cdot min^{-1}$	电解液压力/MPa	电解液温度/℃	加工间隙/mm
1	12.5	100	1.27	1.05	32	0.50
2	13	150	3.81	1.40	32	0.50
3	13	150	3.81	1.40	32	0.50
4	13	150	3.81	1.05	32	0.50
5	13	150	5.33	1.40	35	0.50
6	13	150	4.57	1.47	35	0.50

5.3.3 圆锥单边楔形工作齿阴极微机控制移动轨迹加工

对线型较浅、缠角变化较小的混合膛线也可以采用圆柱形阴极体、工作齿双边平行的阴极，对于线型较深、缠角变化较大的混合膛线则应采用圆锥楔形工作齿阴极结构，该种阴极设计最关键的是楔形工作齿角度和流场设计。一般需通过工艺试验，确定阴极的长度、直径、圆锥大小及楔形工作齿角度等尺寸，已经在不同口径、不同膛线线型的多种混合膛线的批量生产中得到成功应用。按照加工对象的不同，工作齿和阴极体的设计也不尽相同，比如，对缠角变化很大的混合膛线经过反复试验，楔形工作齿的双边角度分别为 α 和 β（α 等于缠角，$\beta>\alpha$），其阴极结构如图 4.4-51 所示。

与上述方法比较，用圆锥楔形工作齿阴极结构电解加工膛线具有加工效率高，工艺稳定可靠，表面质量好，易于实现计算机控制等特点。采用该型阴极进行电解加工的炮管膛

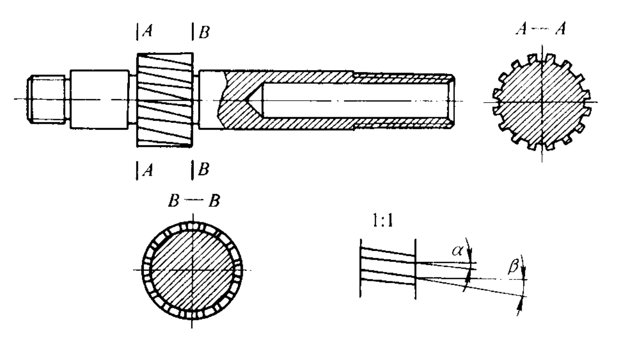


图 4.4-51　单边楔形工作齿圆锥阴极的阴极体结构

线从渐速段到等齐段的线型是在允许的范围内由宽逐渐变窄的，根部圆角较大（这是由线型规格设计的阴极决定的）。靶场试验证明，膛线的线型由宽变窄，将会提高火药气体的密封性，有利于提高弹丸的初速和射击精度，膛线线型渐渐变化以及膛线有较大的根部圆角，有利于提高炮管的寿命。

5.3.4　炮管膛线电解加工参数的微机控制

1）炮管进、出口电解加工参数微机控制　炮管的阳线（内孔）电解抛光或阴线（膛线）电解成形加工过程中，阴极进入炮管和离开炮管时，由于加工面积的变化以及炮管进出口流场和电导率的差异均会导致炮管阳线和阴线出现"喇叭口"现象。手动控制电解加工参数时，在进出口处需要熟练的操作工人不停地观察电流变化，实时调节电压以减小喇叭口的产生，调节过快可能会产生收口，调节过慢可能会产生扩口，严重时出现废品。为了解决上述炮管进出口尺寸变化的问题，从大量试验中总结出加工过程的电流变化曲线，据此建立数学模型并编制计算机控制程序，该程序是基于采用进出口控制电压、中间段控制电流的方法进行全程控制的，在生产实践中已收到良好的效果，加工后炮管全程尺寸精度可达 0.01～0.02 mm。

采用计算机控制加工参数的硬件系统比较简单，关键是要有抗干扰措施，以保证在强电的工作现场能稳定运行。其控制系统原理如图 4.4-52 所示，控制流程图见图 4.4-53。

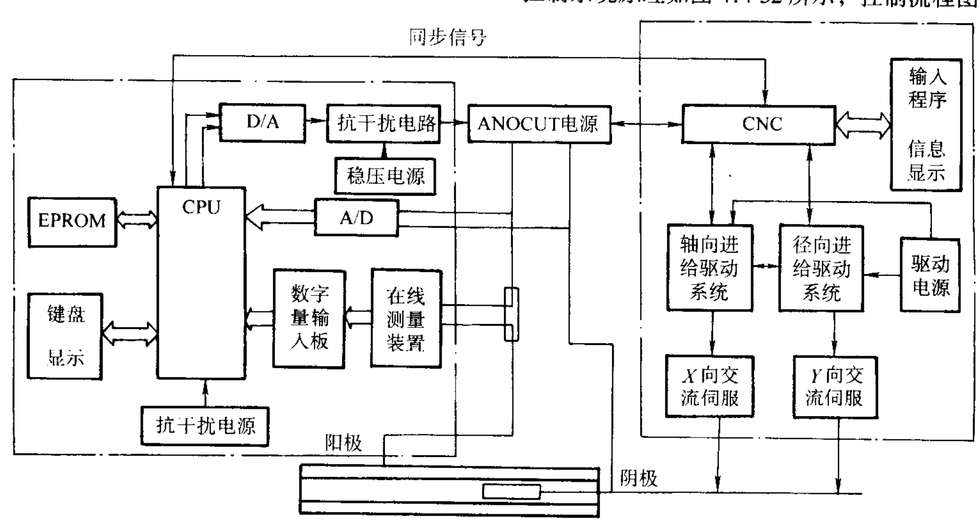


图 4.4-52　控制系统原理图

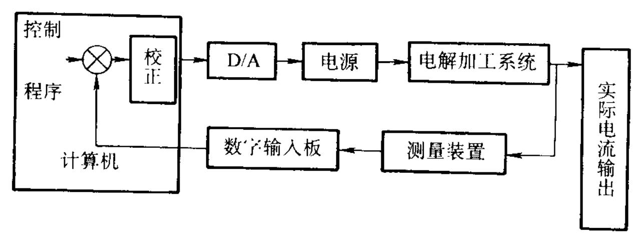


图 4.4-53　控制流程图

2）带有渐速段的混合膛线阴极运动轨迹的 CNC 控制及其与加工参数的同步控制　混合膛线一般由二段或三段不同缠角的膛线所组成，图 4.4-54 为混合膛线展开示意图。

在轨迹控制的同时，还需同步地控制阴极等齐段和渐速段的加工参数。阴极工作齿是有一定长度的，阴极按照弹道方程作轴向进给和径向转动时，阴极工作齿在变缠角渐速段的缠角方向的投影是一个变值，根据法拉第定律，电解加工蚀除体积

$$V = \eta\omega It$$

膛线在 t 时间内蚀除体积也可按蚀除尺寸计算

$$V = nsvt = nv(h_k + \Delta_d)(b_k + 2\Delta_c + \delta)t$$

式中，n 为膛线条数；v 为进给速度 mm/min；s 为被去除的垂直于进给方向的膛线横截面积，mm^2；h_k 为阴极工作齿高，mm；b_k 为阴极工作齿宽，mm；Δ_d 为阴极工作齿距阴线底部的间隙，mm；Δ_c 为阴极工作齿距阴线侧面间隙，

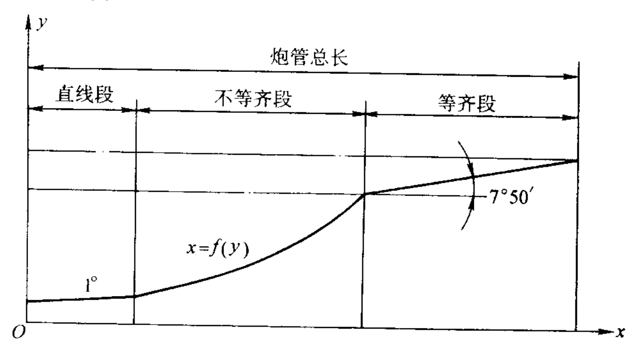


图 4.4-54　混合膛线展开示意图

mm；δ 为阴极工作齿在缠角方向的投影，mm。

对以上二式进行运算可得

$$I = nv(h_k + \Delta_d)(b_k + 2\Delta_c + \delta)/\eta\omega$$

在变缠角的渐速段，因为阴极工作齿的长度在缠角方向的投影随着阴极进给在变化，δ 是变量，其去除掉的膛线槽将不等宽。在恒速进给的条件下，如果要加工出膛线槽宽一致的阴线，蚀除体积便是个变量，也就是说加工电流随缠角改变。按照电流变化曲线手动控制电流的难度较大，则变缠角的渐速段尺寸不易保证。如果维持电流不变，则进给速度 v 便是一个变量，采用交流伺服电机与 CNC 组成的控制系统（见图 4.4-52）可以方便地通过编程实现阴极进给速度 v 的动态控制。

进给速度随缠角的变化规律是这样获取的：在表面加工质量好的一批炮管中，选择一根，每20 mm切样一片，经过投影放大，对试样的加工尺寸进行测量，得到加工尺寸随缠角变化的规律，根据加工速度（进给速度）与加工尺寸的关系，换算出对应每一个电流值的进给速度值，从而得到恒电流加工时速度变化的规律。

按照上述规律进行软、硬件设计，再进行工艺试验，对炮管切片进行投影放大检查，直至合格并纳入工艺规程。

6 整体叶轮加工

6.1 等截面叶片整体叶轮电解套型加工

许多航天发动机的整体涡轮转子，很难、甚至无法用机械切削方法进行加工，目前大都采用电解套型方法加工成形。叶轮材料有钛合金、不锈钢、高温合金钢；电解套型加工叶片型面精度一般为0.1 mm，表面粗糙度 $R_a0.8\ \mu m$，叶片最小通道2.5 mm，叶片长度10～26 mm。类似的可采用电解套型加工的零件还有不锈钢叶栅环、导向环、铝合金静环等。

用电解套型方法加工等截面叶片整体叶轮，根据整体叶轮材料不同，要选择不同的电解液和加工电压。

（1）电解液

1）不锈钢、高温合金钢、铝合金加工用电解液　使用 $NaNO_3$ 电解液加工这三种材料为非线性加工，电解液浓度低非线性较好、但加工效率较低；电解液浓度高非线性较差，但加工效率较高；经多年加工实践证明，使用10%～25% $NaNO_3$ 较为合适。

2）钛合金加工用电解液　经多年加工实践证明，使用NaCl和 $NaNO_3$ 混合液较为合适；根据钛合金种类不同可以适当调整NaCl和 $NaNO_3$ 的浓度和比例。

（2）加工电压

1）不锈钢、高温合金钢、铝合金加工用电压　使用 $NaNO_3$ 电解液加工这三种材料为非线性加工，电压低非线性较好，但加工效率较低；电压高非线性较差，但加工效率较高；经多年加工实践证明，使用15～20 V较为合适。

2）钛合金加工用电压　钛合金加工电解加工时，表面生成致密的钝化膜，分解电压高，必须用较高加工电压才能维持正常加工，一般用24V较好。

整体涡轮转子加工是典型的电解套型加工，我国首都机械厂创新发展的小间隙电解加工工艺及倒置绝缘腔阴极结构设计（图4.4-55）是该项加工的重要工艺特点，是实现高精度、低表面粗糙度叶片型面加工的重要技术保证。对此，在第5章第3节小间隙电解加工中还将做详细论述。

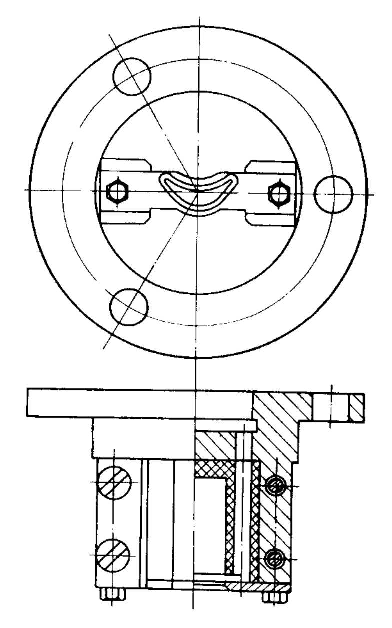


图4.4-55　倒置绝缘腔结构

6.2 变截面扭曲叶片整体叶轮加工

为了满足飞机高速、高推重比的要求，各类新型航空发动机相继设计三维扭曲叶片的压气机叶轮及整体涡轮。这类叶轮很难加工，特别当叶轮直径小、叶片多、通道窄时，受刀具刚性限制，数控铣削相当困难，而电解加工却更能发挥其优势。以扭曲叶片导风轮和整体涡轮为例，介绍一项我国独自研究成功的、已经在生产中稳定应用的机械靠模仿形电解加工技术，它特别适用于直纹扭曲型面、即用直线衍生创成（展成）的型面加工。其加工整体叶轮的步骤是：先用特别的阴极，在叶轮的轮盘毛坯上机械靠模仿形电解加工叶间通道，即同时加工成形相邻两叶片中的一个叶盆型面和另一个叶背型面，逐次分度进行，完成叶轮的粗加工；然后再用特制的锥形电解磨轮，逐个依次机械靠模仿形电解磨削叶盆、叶背型面，完成整体叶轮叶片型面精加工。

6.2.1 成形平板阴极仿形电解加工叶间通道

（1）加工原理

如图4.4-56所示，利用特制的内喷式平板（按叶间通道截面形状近似设计为成形板）阴极（图4.4-57），连接直流电源负极，相对整体圆盘工件作如下运动：沿轴线 x 方向的直线进给运动 $S_{刀送}$，围绕机床动力头主轴的摆动 $\omega_{刀摆}$；同时圆盘（接直流电源正极）也围绕自身轴线 x 做旋转运动 $\omega_{工摆}$；电解液由阴极底板出液槽喷出，则相对于阴极成形

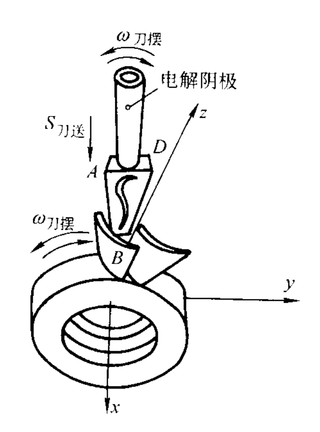


图4.4-56　仿形电解加工整体叶轮叶间通道的运动图解

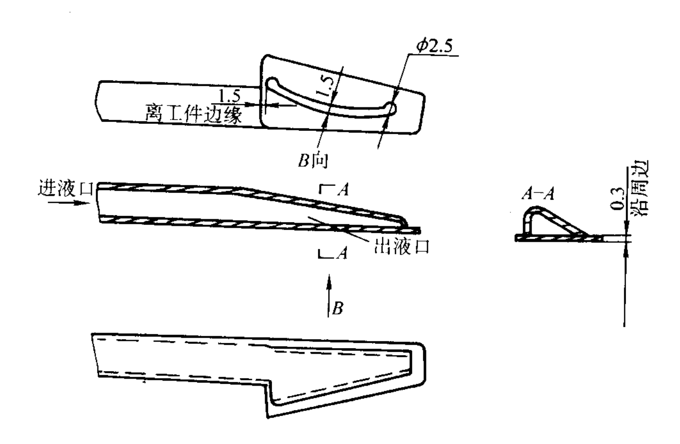


图4.4-57　内喷式成形底板仿形电解阴极

底板的圆盘表面被电解。由于阴极、圆盘间进行 $S_{刀送}$、$\omega_{刀摆}$和$\omega_{工摆}$联动加工进给运动，则随着加工进给，在圆盘上加工成形叶片通道，阴极底板上的两条直线刃边分别形成一个叶片的叶盆型面和另一个相邻叶片的叶背型面（图 4.4-56）。当然，这一成形加工是近似的，因为叶盆、叶背同时加工，但仿形运动不能同时都严格满足两者的成形要求；另外，叶间通道截面大都不是等截面，只用一个确定的成形底板不能精确成形非等截面的叶间通道，故随后还要分别精加工叶盆、叶背型面。

（2）夹具结构

实现上述仿形运动的机械靠模及夹具示于图 4.4-58，工件定位安装于夹具旋转体上，分度销能保证工件旋转分度，则实现逐个分度加工叶间通道，工具阴极安装于机床动力头主轴上，同时实现垂直向下的加工进给及围绕主轴中心线的摆动。关键运动 $\omega_{刀摆}$ 与 $\omega_{工摆}$ 的产生及协调来自于固定靠模及随动靠模的仿形型面。固定靠模定位安装在夹具底板上，而夹具底板又是同夹具座一起调整安装在机床工作台上的，当分度销插入时，夹具旋转体随旋转轴一起相对夹具座可做旋转运动，则安装在夹具旋转体上的工件及随动靠模也都能相对夹具座中心轴线作旋转运动。

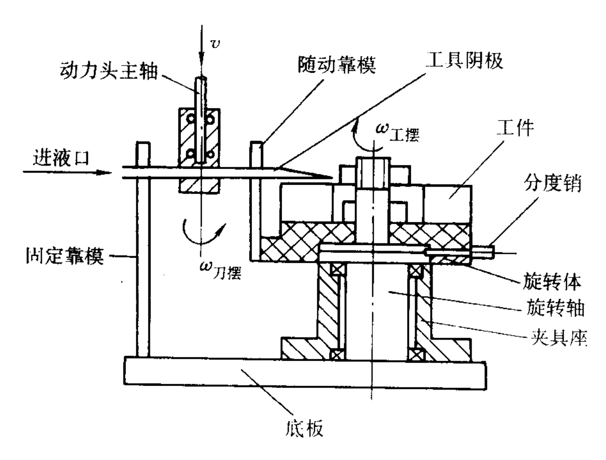


图 4.4-58　机械靠模仿形电解夹具

（3）靠模修整

固定靠模及随动靠模的仿形型面先粗略成形，然后在机床上精修是一项非常专门的技术工作。将一个标准整体叶轮安装于夹具上，同时将合格的阴极也安装于机床主轴工作位置，将阴极底板的一个刃边贴紧一个叶片的型面，随着机床向下进给，逐步修整靠模仿形型面，最终应达到随阴极垂直向下进给运动时，阴极杆与固定靠模、随动靠模的仿形型面、阴极底板的加工刃边与叶片型面都能均匀、良好接触。具体办法可着色检查。故仿形型面需要多次反复修整，而且更换一次阴极或重新安装一次夹具，都应重新进行着色检查，如有偏差则需重新精修。

（4）主要工艺参数

某型导风轮：外径 ϕ189.4 mm，
　　　　叶片长 × 宽：53 mm × 50 mm

材料：2Cr13，HRC 30 ~ 37，
　　锻造毛坯：ϕ189.4 mm × 50 mm

电解液：10% NaCl + 0.1% K_2CrO_4，液温 28 ~ 35℃

供液压力：0.7 MPa

加工电压：14 ~ 16 V

电流密度：60 A/cm^2

垂直进给速度：1 ~ 1.4 mm/min

加工间隙：底面 0.15 mm，侧面 0.4 ~ 0.5 mm

加工结果：叶盆余量 0.1 ~ 0.5 mm
　　　　叶背余量 0.5 mm
　　　　表面粗糙度 R_a12.5 μm

6.2.2　锥形砂轮仿形电解磨削叶片型面

采用锥形砂轮（图 4.4-59），实现如图 4.4-60 所示的仿形运动：其中主运动 $S_{刀送}$，同时有 $\omega_{刀摆}$ 和 $\omega_{工摆}$，当砂轮主轴高速旋转并接直流电源负极，工件接正极时，则砂轮对叶片型面进行电解磨削，以不同的仿形运动，分别实现叶盆、叶背型面的精加工。其机械靠模仿形运动机构类似于电解开槽的靠模与夹具，即在工具阴极位置安装磨头，令锥形砂轮高速旋转；同时固定靠模型面、随动靠模型面要分别相对叶盆型面、叶背型面修整，故仿形运动轨迹能严格保证叶盆、叶背型面磨削精度要求。

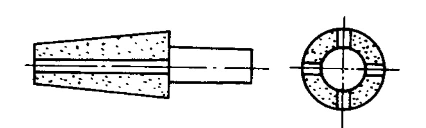


图 4.4-59　仿形电解磨削用的锥形磨轮

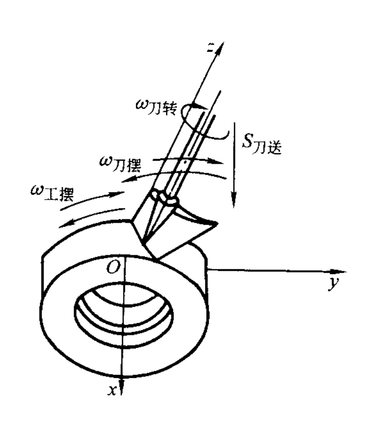


图 4.4-60　仿形电解磨削叶片型面的运动图解

对前述电解开槽的整体叶轮分别进行叶盆、叶背型面电解磨削精加工，其主要工艺参数如下：

电解液：10% NaCl + 15% $NaNO_3$ + 3% Na_2SiO_3 + 0.5% $C_4H_4O_6KNa_4H_2O$

供液压力：0.3 MPa

加工电压：7 ~ 9 V

加工电流：30 ~ 40 A

磨轮转速：5 000 ~ 7 000 r/min

磨轮垂直进给：2 ~ 3 mm/min

磨轮最大切深：1.5 mm

加工结果：型面余量（最大）0.3 mm
　　　　型面精度 0.2 mm
　　　　表面粗糙度 R_a3.2 μm

最后还要手工精抛，但劳动量大大减少。

机械靠模仿形电解、电解磨削加工整体叶轮是对电解加工技术的重大革新，已经应用于加工某些叶轮型面，但其靠模机构的制造、特别是靠模仿形面的修整需要工人手工操作，技术难度大，花费时间长；而且机械靠模仿形运动的可靠性、准确性都有待改进，特别在电解液喷射的环境中很难精确保证。为了解决这些问题，特别是为了提高加工柔性、提高仿形展成运动精度和运动控制的可靠性，在机械仿形电解加工技术的基础上发展了数控展成电解加工技术，主要目的就要为了解决变截面扭曲叶片整体叶轮的加工难题。有关内容将在第 5 章介绍。

6.3 应用实例

(1) 双级涡轮转子（图 4.4-61）

材料：高温合金钢；叶片精度 0.1 mm，表面粗糙度 R_a0.8 μm。

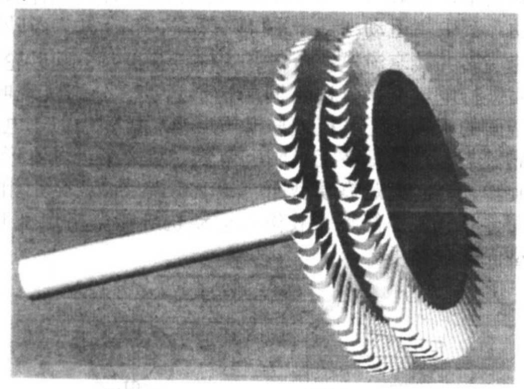


图 4.4-61　双级涡轮转子

(2) 双级叶轮（图 4.4-62）

材料：高温合金钢；叶片精度 0.1 mm，表面粗糙度 R_a0.8 μm。

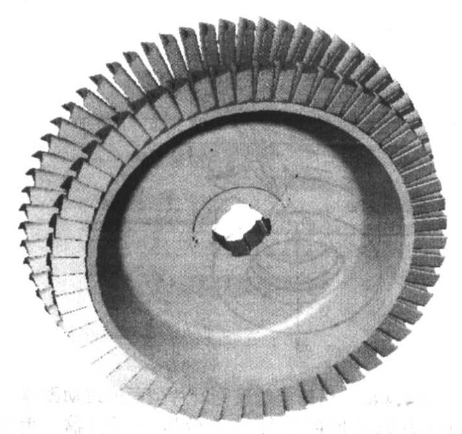


图 4.4-62　双级叶轮

(3) 导向环（图 4.4-63）

材料：不锈钢；叶片精度 0.1 mm，表面粗糙度 R_a 为 0.8 μm。

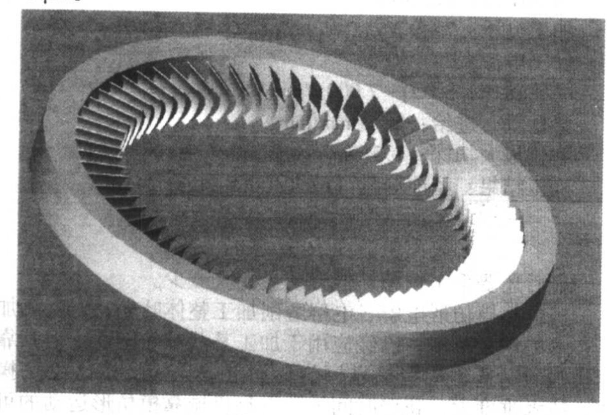


图 4.4-63　导向环

(4) 叶栅环（图 4.4-64）

材料：不锈钢；叶片精度 0.1 mm，表面粗糙度 R_a 为 0.8 μm。

(5) 小导向环（图 4.4-65）

材料：钛合金；叶片精度 0.1 mm，表面粗糙度 R_a0.8 μm。

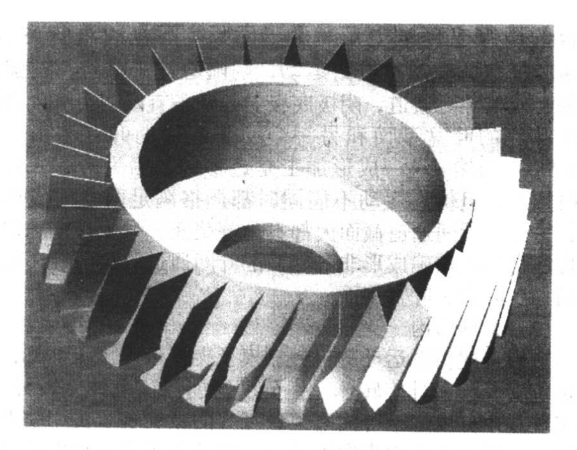


图 4.4-64　叶栅环

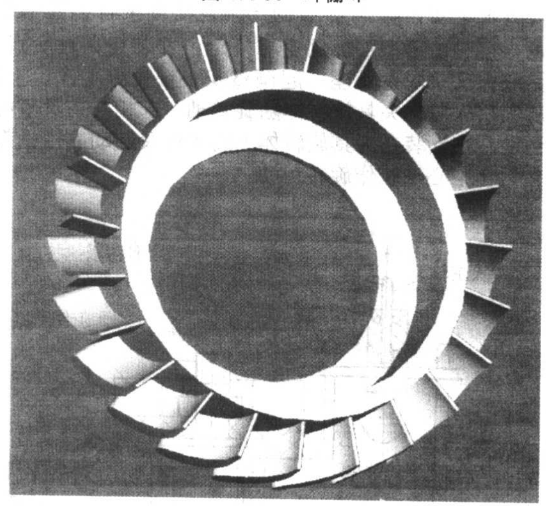


图 4.4-65　小导向环

(6) 静环（图 4.4-66）

材料：铝合金；叶片精度 0.16 mm，表面粗糙度 R_a0.8 μm。

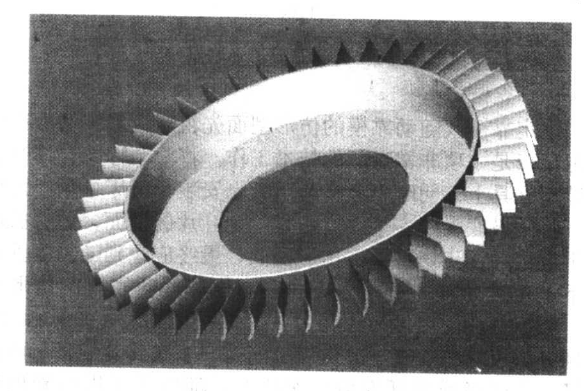


图 4.4-66　静环

7　电化学去毛刺

7.1　概述

毛刺是金属切削加工的产物，难以完全避免。毛刺的存在，不仅影响产品的外观，而且影响产品的装配、使用性能和寿命。随着高科技的发展、产品性能要求的提高，对产品质量的要求越来越严格，去除机械零件的毛刺就愈加重要。

金属材料向高强、高硬、高韧方向的发展，机械产品中复杂整体构件日益增多，去毛刺的难度也随之增大，传统的手工去毛刺作业很难满足要求。各种机械化、自动化去毛刺新技术、新工艺应运而生。



电化学去毛刺是一种先进的去毛刺技术，是电化学加工技术中发展较快、应用较广的一项工艺。常见电解去毛刺的种类见表 4.4-11。

基于电化学加工的基本原理，电化学去毛刺对工件无机械作用力，容易实现自动化或半自动化，适合去除高硬度、高韧性金属零件的毛刺，还可以去除工件特定部位的毛刺。例如，对于手工难以处理、可达性差的复杂内腔部位，尤其是交叉孔相贯线的毛刺，利用电化学去毛刺有着明显的优势。电化学去毛刺对加工棱边可取得较高的边缘均一性和良好的表面质量，具有去除毛刺质量好、安全可靠、高效等优点，和传统工艺相比，一般可提高效率 10 倍以上。

电化学去毛刺设备已有系列产品，在汽车发动机、通用工程机械、航空航天、气动液压等众多行业得到应用，是电化学加工机床中生产批量较大，应用领域较广的重要装备。

表 4.4-11　电化学去毛刺的分类

毛刺部位	典型零件
孔周边	1）曲轴、连杆、活塞、油泵、油嘴等油路孔 2）气动液压件阀体内孔，交叉孔 3）航空航天发动机燃烧室部件、涡轮部件 4）航空航天控制阀体、管件
槽周边	1）内燃机、柱塞、针阀体、盛油槽 2）套筒、滑槽、滑阀
异型腔、槽周边	1）齿轮、花键 2）航空发动机涡轮盘榫槽、榫齿
外形棱边	1）柴油机、汽油机、缸体、壳体、泵体 2）纺机气流通道、食品、药品的成形机

7.2　电化学去毛刺的工艺特点

7.2.1　局部阳极溶解

电化学去毛刺的原理仍然是金属在电解液中发生基于电化学作用的阳极溶解，但与一般电解加工不同，电化学去毛刺加工时，工件毛刺部位的加工间隙显著小于工件其他部位的间隙，电流场集中在工件的棱边毛刺处，即阳极表面的尖端部位，相对比较容易在短时间内对毛刺完成定域局部阳极溶解。图 4.4-67 为电化学去毛刺原理示意图。

7.2.2　非加工面保护

要实现有选择性地对工件毛刺部位进行电化学加工，必须将与工件非加工部位对应的工具阴极表面绝缘，从而切断阴极通往工件非加工部位的电力线，保护非加工表面不发生阳极溶解，防止或尽量减少电化学反应对非加工表面造成杂散腐蚀。

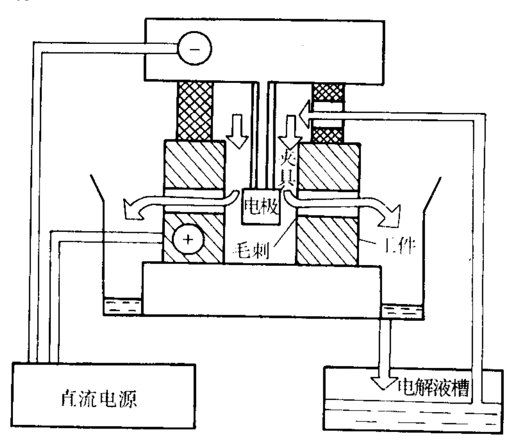


图 4.4-67　电化学去毛刺原理示意图

7.2.3　固定式阴极加工

相对而言，电化学去毛刺的成形精度、尺寸精度都不如电解成形加工要求高；另外，一般情况下，电化学去毛刺的生产批量大，要求有较高的生产率；因而电化学去毛刺多采用固定式阴极加工，既可以保证去毛刺精度、质量要求，又容易实现高效率。通常，电化学去毛刺需要设计制造专用工具阴极和夹具工装，工具阴极与工件阳极之间没有相对运动，而是准确地安装定位阴极与工件去毛刺处于固定的位置和一定间隙，保证阳极溶解在限定区域内进行。

固定式阴极的安放位置要求严格，首先要保证阴极与毛刺不会接触而造成加工时短路；同时，对于高度大于 1 mm 的大毛刺，应将阴极放置在能使毛刺从根部溶解的位置上（图 4.4-68a）；对于较小的毛刺，则可将阴极放置在毛刺可以沿高度方向溶解的位置上（图 4.4-68b）。这种固定式阴极加工形式，由于两极间无相对运动，因而比较安全，不容易产生短路或非加工面的损伤。

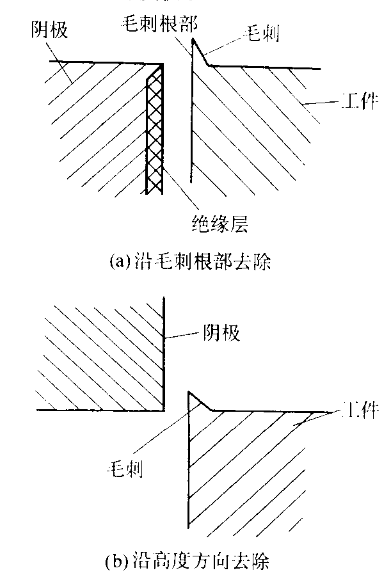


图 4.4-68　工具阴极的布局

7.2.4　专用夹具、阴极（图 4.4-69）

专用夹具、阴极组件是电化学去毛刺工艺装备的核心，它应具备以下功能：

1）工件的定位、夹紧及其与电源正极的导电连接；

2）工具阴极的定位、夹紧及其与电源负极的导电连接；

3）阴极结构应保证足够刚性，实现符合加工要求的均匀加工间隙；

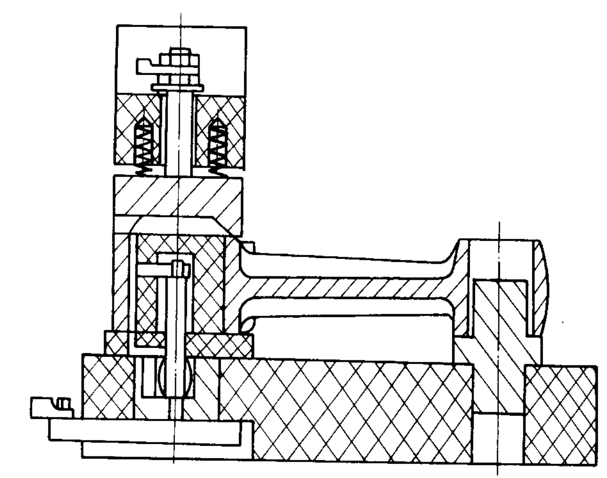


图 4.4-69　连杆电化学去毛刺夹具、阴极示意图

4）对应工件非加工面的工具阴极表面有可靠的绝缘保护；

5）夹具结构能实现通往加工区符合流体动力学条件和流场分布要求的电解液传输。

7.2.5 流场选型特征

电化学去毛刺的电解液流动形式分正流式及侧流式两种主要类型。图 4.4-70 为两种正流式结构示意图。图 4.4-71 为两种侧流式结构示意图。正流式的优点是工具阴极较为简单、易于布局，其缺点是电解液流动方向在加工区域突然变化，发生90°转折，向两个相反方向分流，这样容易导致加工区流场不均匀、不稳定，影响加工质量。侧流式的电解液流动方向没有突变，因而流场较为均匀、稳定，试验结果表明其加工质量较正流式为好，缺点是工具阴极结构相对复杂一些，对非加工面的绝缘要求亦较高。

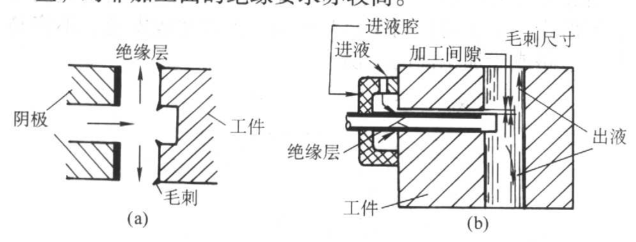


图 4.4-70 正流式结构示意图

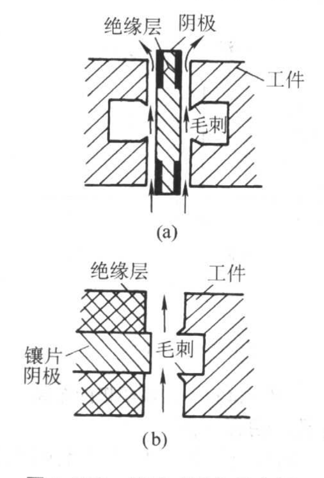


图 4.4-71 侧流式结构示意图

7.2.6 常用加工参数

低浓度钝性电解液的集中蚀除能力较强，既有利于尖角棱边处毛刺的去除，也有利于减少对非加工面的杂散腐蚀，在电化学去毛刺加工中得到普遍采用，如低浓度硝酸钠、硝酸钾溶液及以它们为基的低浓度复合工作液，实际使用中还可添加少量缓蚀剂以减少对工件、机床、工装的锈蚀。电化学去毛刺常用工艺参数参见表 4.4-12。

表 4.4-12 电化学去毛刺工艺参数

项 目	参 数
电解液成份	$NaNO_3$、KNO_3 等
电解液浓度/%	5～15
电解液温度/℃	25～35
电解液压力/MPa	0.1～0.3
电解液流量/L	0.5～1.5 L/min·cm（棱边长度）
加工电压/V	10～20
加工电流/A	2.5～6 A/cm（棱边长度）
加工间隙/mm	0.3～1
加工时间/s	5～40

7.3 电化学去毛刺的设备

7.3.1 电化学去毛刺设备的类型

电化学去毛刺设备的要求与电化学加工设备相同，成套设备包括机床主体、电源与控制系统、电解液循环装置等，以及根据不同去毛刺工件而设计的专用夹具、阴极、工装。通常将电化学去毛刺设备分为通用型和专机型两大类。

7.3.2 通用型电化学去毛刺设备

通用型设备按电源额定功率、电解液箱容量、工作台尺寸等参数规格制成系列化产品，对各种去毛刺工件，配有可更换的夹具、阴极、工装，即通用机床配专用工装。这类设备的机床主体又可分为单工作台、单件加工与多工作台、多件加工或单件一处加工和单件多处同时加工等。一般情况，通用型电化学去毛刺设备采用手工装卸工件，加工过程手动循环，适用于中小型零件、中等批量的去毛刺加工。

7.3.3 专机型电化学去毛刺设备

专机型设备是针对大型复杂零件去毛刺加工而专门设计制造的专用设备，这些零件如发动机曲轴，连杆、箱体、泵体等。专机型电化学去毛刺设备又可分为半自动和全自动两种。半自动专机为手工装卸工件，其他工序为自动化操作。全自动专机使用机械或机器人装卸工件，实现装料、传输，定位、加工、冲洗，防锈、卸料全过程自动化，生产率很高。法国 Emault Somua 公司汽车曲轴电化学去毛刺专机自动线完成 13 道工序，生产率达 100 件/h。图 4.4-72、图 4.4-73 分别为单臂式多工位、龙门式多工位两种通用型电化学去毛刺设备，图 4.4-74 为曲轴电化学去毛刺全自动专机。

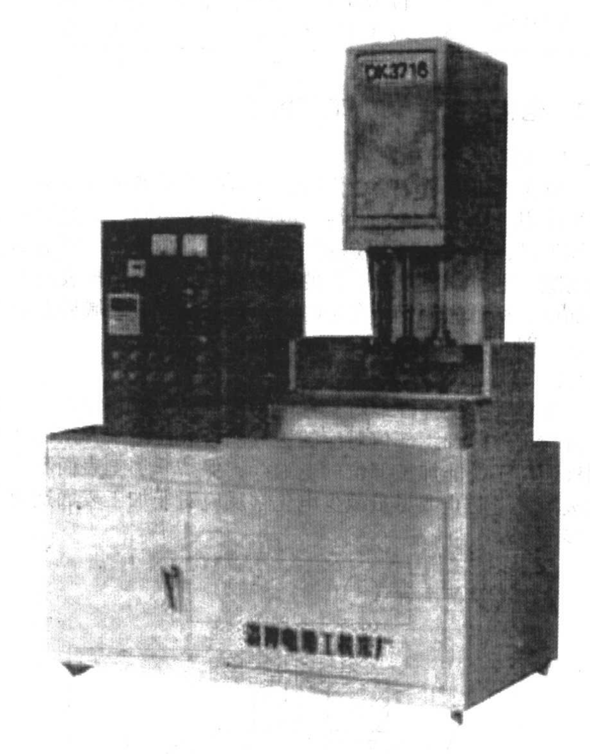


图 4.4-72 单臂式多工位通用型电化学去毛刺设备

7.4 电化学去毛刺应用实例

电化学去毛刺工艺及设备在国内外机械制造工程领域得到广泛的应用，欧美俄等国家应用电化学去毛刺较为普遍。较长时间以来，我国在军、民品工业中也逐渐采用，取得良好效果。

图 4.4-75 为电化学去毛刺零件样品。表 4.4-13 列举了部分有代表性的应用实例及相关参数，供选用参考。



图 4.4-73　龙门式多工位通用型电化学去毛刺设备

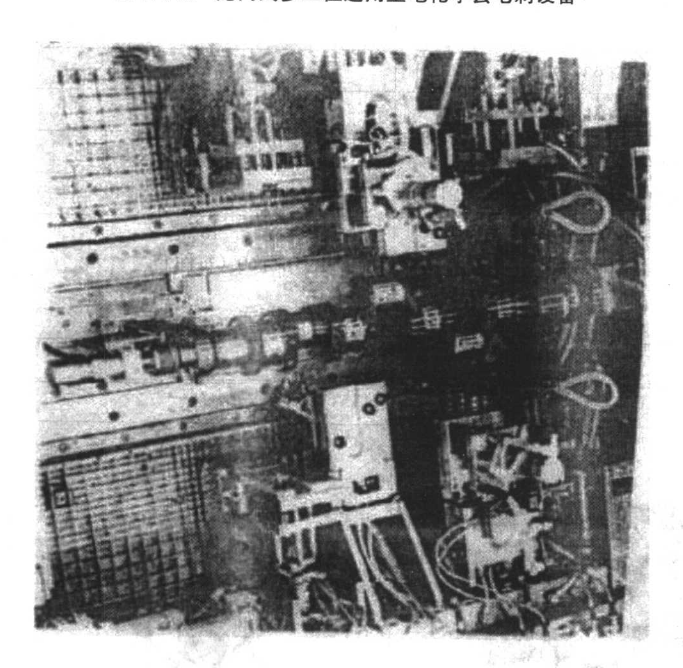


图 4.4-74　曲轴电化学去毛刺全自动专机

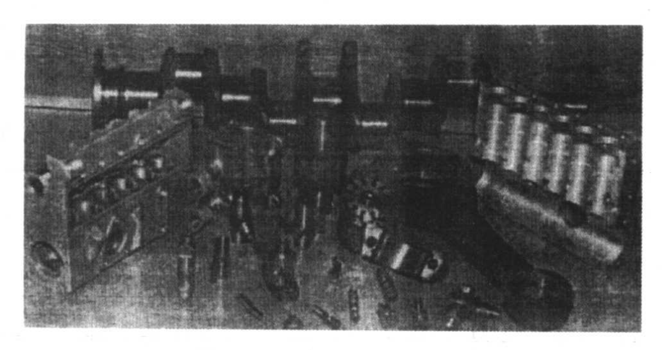


图 4.4-75　电化学去毛刺样品

7.5　电化学去毛刺的新发展

"毛刺虽小，危害很大"。要制造高品质机械产品，去除零部件外形、外观类毛刺，去除内腔功能性棱边的毛刺，实施光整加工，提高表面质量，不仅非常必要，而且至关重要。这种理念已成为机械制造业的共识。

近年来，在航空航天、燃油喷射、精纺机械等精密零部件中，对功能性棱边圆弧的光整加工要求愈加突出，对圆弧的尺寸和精度控制极其严格，某些棱边圆弧半径尺寸要求≤0.01 mm。这些棱边倒角是否形成光滑圆弧，圆弧 R 的大小及分散度，对于整机的物理、化学热力学、流体动力学性能及燃烧排放环保指标等，往往是关键的影响因素。

功能性棱边的光整加工工艺，要求毛刺完全去除，机械切削残留物彻底清理，实现可控尺寸精度的圆弧倒角，同时降低相应加工表面的粗糙度。

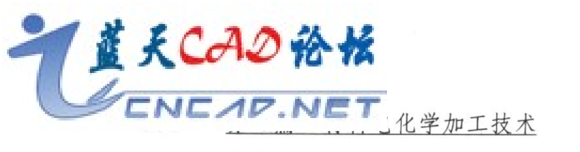
随着国内外电化学加工机理研究工作的深入，脉冲电流、数控展成、复合加工等新技术的应用，电化学去毛刺技术取得新的发展，尤其是在功能性棱边的光整加工中发挥出独特的作用。

对于气液伺服阀，发动机喷嘴等精密零件内腔的功能性棱边，ϕ0.10～1.00 mm 的微小孔相贯线，研究人员在传统电化学去毛刺技术的基础上，把去毛刺、抛光、棱边倒角等工艺要求结合起来，成功实现高精度光整加工，圆弧可控尺寸从原来的±0.12 mm 左右降至±0.01 mm 之内，加工表面粗糙度从 R_a10 μm 降低到 R_a1 μm 左右，并且可保持精密零件交叉孔型面等相关尺寸不变。

电化学去毛刺的新发展，使其成为精密零件特殊部位功能性棱边精密光整加工的高新工艺技术，在精密机械制造工程中，开辟了新的应用的领域。

表 4.4-13　电化学去毛刺应用实例

名称	曲　　轴	3 段曲轴	连　　杆
简图			
尺寸/mm	长度：700～1 300	宽：140；深：100 高：145、145、130	325×120
材料	34CrNiMo6	34CrNiMo6	34CrNiMo5
工步	1）中央孔进口尖边倒圆 2）交叉孔去毛刺 3）齿牙去毛刺 4）端面及立轴进油孔倒圆	轮毂和轴颈上的 内外润滑孔尖边倒圆	润滑油孔、油槽尖边去毛刺



续表 4.4-13

名称	曲　　轴	3段曲轴	连　　杆
设备	1～3工步：全自动机； 4工步：半自动机	双头半自动去毛刺机 EMV11S	全自动机，含装卸零件， 清洗防腐处理
工艺参数 电压/V	16	20	20
工艺参数 电流/A	2 200	1 300	480
工艺参数 间隙/mm	0.3～0.8	0.3～0.5	
工艺参数 电解液	$NaNO_3$	$NaNO_3$	$NaNO_3$
加工时间	4个工步共5 min	30 s	一个工序 42 s
名称	控制轴	控制套筒	喷嘴
简图			
尺寸/mm	$\phi35\times112$	$\phi42\times\phi31.5\times85$	$\phi17\times53$
材料	45	20MoCr5	100Cr6
工步	槽边及驱动轴颈去毛刺	周边孔及槽边去毛刺	孔与弧形槽内壁交会处去毛刺
设备	半自动去毛刺机 EMV1	半自动去毛刺机 EMV1	全自动机 EMVR1，同时加工 24 件
工艺参数 电压/V	18	20	16
工艺参数 电流/A	550（2件）	420（2件）	60（每件）
工艺参数 间隙/mm	0.4～0.5	0.5	
工艺参数 电解液	$NaNO_3$	$NaNO_3$	$NaNO_3$
加工时间/s	30	15	60
名称	齿轮	连接套	壳体
简图			
尺寸/mm	$\phi110.6\times219.1$	$\phi25\times14$	$110\times110\times140$
材料	20MoCr4E	20MoCr4E	GGG40
工步	齿轮周边去毛刺，同时加工4件	内齿去毛刺（同时加工7件）	外廓面孔周边及内环面 交叉孔周边去毛刺
设备	半自动单头去毛刺机 EMY2	半自动双头去毛刺机 EMV2	半自动双头去毛刺机 EMV1
工艺参数 电压/V	16	17	20
工艺参数 电流/A	1 000	600	200
工艺参数 间隙/mm	0.5	0.4～0.5	0.4～0.5
工艺参数 电解液	$NaNO_3$	$NaNO_3$	$NaNO_3$
加工时间/s	40	6	35

编写：田继安（首都航天机械公司）
陈远龙（合肥工业大学）
王建业（华南理工大学）
徐家文（南京航空航天大学）
王天诚（昆仑机械厂）
侯中一（苏州电加工机床研究所）



第 5 章　电解加工新技术

创新是促进科学技术发展的原动力。新型科学技术的出现，是创新发展的结果。虽然电解加工从 20 世纪 80 年代以来的扩大应用不像它在 60、70 年代那样迅速，但为了解决应用、发展中存在的问题，近 20 年来，围绕提高电解加工精度和加工稳定性，依然在不断进行创新研究，出现了一些令人振奋的研究成果。如 20 世纪 70 年代末期开始研究脉冲电流电解加工并逐渐得到推广应用，这是直流电解加工出现 20 余年后的重大技术创新，开阔了电解加工的研究思路，促进了电解加工技术的发展；而随着新型高频、大功率电子器件的发展，在低频、宽脉冲电解加工的基础上，20 世纪 90 年代又出现了高频、窄脉冲电流电解加工，有望将电解加工精度、稳定性再提高到一个新水平。20 世纪 80 年代开始研究的数控展成电解加工技术，综合了数控和电解两者的技术特点，扬长避短，相得益彰，是技术集成创新的研究范例，已从基础原理性研究进入实际应用阶段，已经开始在航空发动机整体叶轮、整体叶盘的加工中得到应用。小孔电液束加工技术在某些先进工业国家早就稳定用于加工航空发动机叶片冷却孔，特别是深径比大、呈空间角度分布的小孔，我国近 10 余年来也取得了重大关键技术的突破，在新型航空发动机制造中得到应用。电解与其他能量复合的加工技术，如电解与机械锉削复合的电解擦削，电解与电火花放电复合的电化学电弧加工（ECAM），电解与超声复合的超声电解加工等，都有其独特的加工效果和应用范围，代表了复合电解加工的发展方向。本章将概要介绍几种比较新的、有其独特工艺特点的电解加工新技术，以扩大视野、启迪思维、促进电解加工技术的发展。

1　脉冲电流电解加工

1.1　脉冲电流电解加工的基本特征

脉冲电流电解加工（Pulse Electrochemical Machining, PECM），按其加工电流的特征可以分为正弦波或矩形波、低频（数十赫兹）或高频（千赫～数十千赫）、宽脉冲（毫秒～数十毫秒）、窄脉冲（数十微秒～数百微秒）及超短脉冲（纳秒级）等类型。按其进给及供电的配合方式则可分为连续供给脉冲电流、连续进给；周期供给脉冲电流、周期进给；连续供给脉冲电流与脉冲同步振动进给三类。

早期的脉冲电流电解加工以低频、宽脉冲、周期供给脉冲电流，周期进给或带同步振动进给的模式为主。这种模式的加工工艺水平较传统的直流电解加工有明显的提高，得到了局部应用。20 世纪 90 年代又发展了连续供给高频、窄脉冲电流，连续进给的模式，在型面、型腔加工技术上有进一步的突破，经过大量试验研究及初步试生产应用已显示出了明显的技术经济效果及重要应用前景。近年来又开展了纳秒级超短脉冲电解刻蚀加工技术研究，开拓了新的微细电解加工研究方向。

本节将侧重介绍高频、窄脉冲电流电解加工的物理化学特性、工艺特点和应用实例。

1.1.1　脉冲电流电解加工的物理、化学特性

脉冲电流电解加工的基本原理就是以周期间歇供电代替传统的连续供电使工件阳极在电解液中发生周期断续的电化学阳极溶解。它利用脉冲电流的脉冲效应导致电解加工间隙过程物理、化学特性的一系列变化。基础的试验研究表明，脉冲频率 f、脉宽 t_p 和占空比 D [t_p/(t_p+t_0)] 是影响间隙过程理、化特性变化的最重要的参数，它们直接影响电化学阳极溶解的集中蚀除能力/散蚀能力以及极间间隙大小及分布的状况，从而影响到加工精度、表面质量和加工效率。图 4.5-1 综合分析、归纳了其基本的影响规律。其主要影响包括：强化了电流效率－电流密度（$\eta-i$）的非线性特性；改善流场并导致加工间隙 Δ 的缩小且分布均匀；改善阳极电位 E_a 的特性。试验研究还表明，在不同的频段和脉宽范围，间隙过程的理、化特性变化状况不尽相同，一般说来，频率越高、脉宽越窄、占空比越小，则脉冲效应就越强，间隙过程的理、化特性变化就越大。现首先就低频、高频段具有共性的基本特征加以阐述。

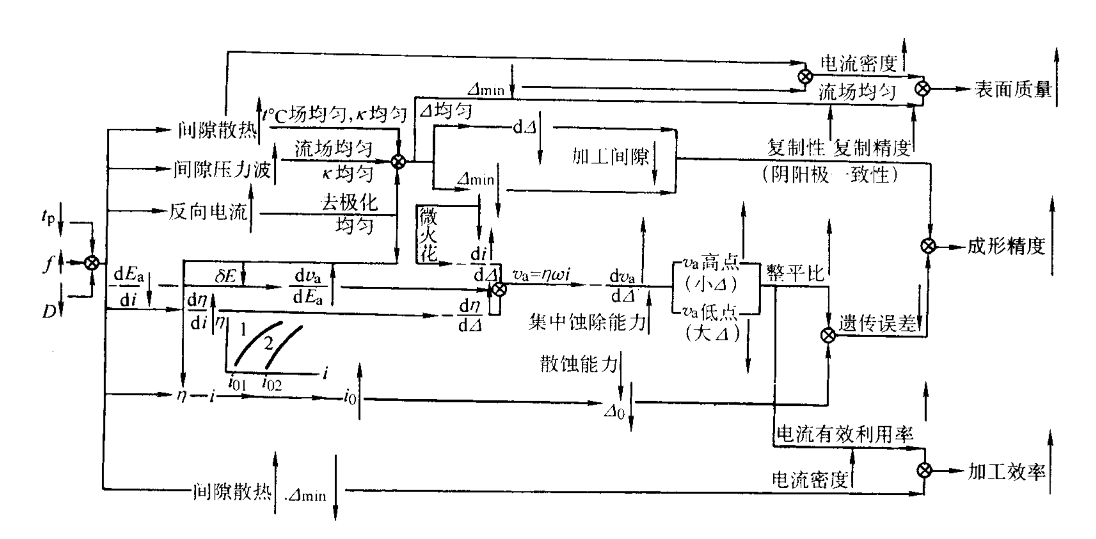


图 4.5-1　脉冲参数对间隙过程的理、化特性及加工结果的影响规律

↑增加；↓减小；E_a—阳极电位；i_0—切断电流密度；Δ_0—截止加工间隙



(1) 电流效率曲线非线性特性的强化

如前所述在直流电解加工中电流效率曲线的特性主要决定于加工材料与电解液的匹配状况。除此而外，近年的试验研究又揭示了脉冲电流效应也会导致 η-i 曲线非线性特性的强化。

1) 用脉冲电流在钝性电解液中加工铁基金属时，其 η-i 曲线较用直流时显著移向高 i 区，切断电流密度 i_0 加大，截止加工间隙 Δ_0 相应减小，导致集中蚀除能力加强。图 4.5-2 以及类似的试验结果均说明了这个变化规律。

2) 图 4.5-3 亦是在钝性电解液中加工模具钢的另一组试验。试验结果除得出上述相同的结论外，还说明当占空比减小时 η-i 曲线亦向高 i 区移动。

导致脉冲电流电解加工中非线性效应强化的原因在理论上尚未完全弄清，但从试件表面状况可以看出，随着脉冲电流密度 i 的变化，活化溶解、钝化溶解与超钝化溶解的电流密度区域与直流条件下是不同的，由此说明脉冲条件下能改变阳极极化特性，在上述几种情况下均扩大了钝化溶解的区域，使超钝化在较高的电流密度下发生，从而使 η-i 曲线向高 i 区移动，某些条件下它还加速了阳极表面从钝化状态向超钝化状态的过渡过程，使这一段的 η-i 曲线上升率（$d\eta/di$）加大，曲线变陡，如图 4.5-2，图 4.5-3 所示。

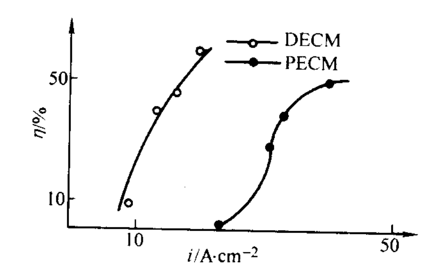


图 4.5-2 脉冲电解加工与直流电解加工的 η-i 对比

加工材料：Cr12MoV；电解液：低浓度 $NaNO_3$ 溶液；

$f = 1$ kHz；$t_p = 500\ \mu s$；$D = 0.5$；$p_a = 0.15 \sim 0.3$ MPa；$T = 22$℃

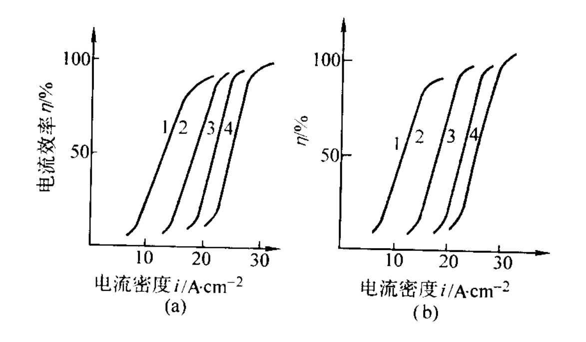


图 4.5-3 直流及脉冲加工中不同占空比的 η - i 曲线特性的对比

加工材料：3Cr2W8；电解液：(a) 12% $NaNO_3$

(b) 6% $NaNO_3$ + 2% $NaClO_3$；

脉冲参数：1—直流；2—$D = 1/2$、$f = 33.3$ Hz；

3—$D = 1/3$，$f = 37.5$ Hz；4—$D = 1/4$，$f = 30$ Hz

(2) 脉冲电流电解加工的阳极电位特性的变化

有一种假说认为，陡峭的脉冲上升沿（在用 MOSFET 斩波时上升沿可达微秒级）导致的快速极化过程使塔菲尔斜率下降，因而 δE 减小，dv_a/dE_a 增大，有利于集中蚀除能力的加强。在达到平衡间隙后，脉间的去极化作用又有利于表面极化电位分布均匀，从而使 Δ 分布趋于均匀。虽然阳极超电位是影响阳极过程特性的重要参数，但由于大电流下阳极电位的测试手段尚不完善，这方面的试验研究尚不充分，还有待深入研究。

(3) 加工间隙中流场压力和温度特性的变化

脉冲电流电解加工间隙中流场的变化首先体现在与脉冲电流同期生成的氢气压力波上，如图 4.5-4 所示。由于阴极析氢量与电流成正比，因而压力波强度随电流密度的加大而加大，其频率亦然。压力波对极间电解液的搅拌作用使脉冲电解加工极间的流场参数趋于均匀，同时，也削弱了浓差极化和钝化极化，改善了电解液对小间隙处的充填能力；其次是间隙热交换条件的改善，这是由于脉冲加工中发热的周期仅为较短的脉冲宽度 t_p，而随后在脉间宽度 t_0 的周期内即散出，这就导致达到沸点温度的电流密度较直流加工为大，而在同样的电流密度下极间温度则较直流加工为低。以上两因素大大减小了最小间隙处因流场恶劣、温度过高而造成的空穴、蒸发和沸腾导致的局部钝化、火花和短路等疵病，提高了间隙过程的稳定性，从而使脉冲电流电解加工的最小稳定间隙较直流加工为小，间隙分布的均匀程度较直流加工为高。

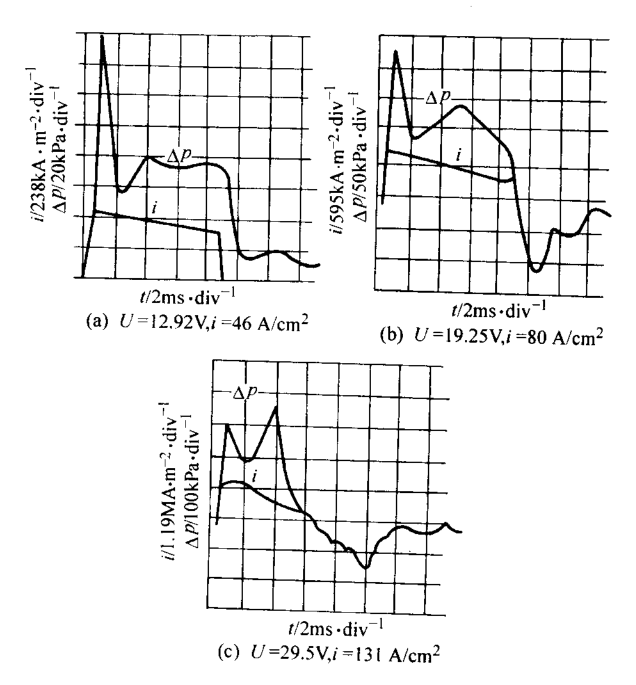


图 4.5-4 极间压力波与脉冲电流波形图

1.1.2 物理、化学特性的改善对加工结果的影响

1) 提高加工精度 如前节所述，影响电解加工精度最重要的两个因素是阳极溶解过程的集中蚀除能力和加工间隙。上节阐明了间隙过程物理、化学特性的变化有利用阳极溶解的集中蚀除能力的加强、散蚀能力的下降，有利于加工间隙的缩小和均匀，这正好可以解决在直流电解加工中集中蚀除能力较弱（散蚀能力较强）和加工间隙较大的两大问题，即可以解决导致直流电解加工精度不够高的两个根源性问题，因而有可能较大幅度地提高电解加工的精度。

2) 改善表面质量 脉冲电流电解加工对表面质量的改善主要体现在：①选择性腐蚀的减弱甚至消除；②表面粗糙度的降低。从表 4.5-1 所列试验结果可以看出，直流加工的表面状况对流场的敏感性较强，Δ 稍小，流场就变得不均匀，就容易出现沿锻造流线方向（表 4.5-1 中图 b）或沿电解液流动方向的流痕（见图 4.5-18 及图 4.5-19），而在脉冲电流加工中由于间隙流场的均匀化，在达到小的平衡间隙后，加工面各处的阳极溶解速度仍能趋于一致，从而可以消除各种选择性腐蚀以及降低各处微观腐蚀的不均匀性，且电



流密度也有所提高，因而可得到低的表面粗糙度（表 4.5-1 中图 c）。

表 4.5-1　脉冲电流与直流电解加工的表面质量比较

加工类型	Δ/mm	i /(A·cm^{-2})	P/MPa	R_a/μm	加工表面状态	加工表面状态图相
DECM	0.50 0.36	10.71 12.00	0.12 0.12	0.972 0.658	均匀、稍粗糙、无流痕	(a)
	0.33 0.25	12.86 13.60	0.13 0.15	1.5	不均匀、较粗糙、有锻造流痕	(b)
PECM	0.08 0.05	25.7 26.4	0.30 0.30	0.557 0.593	均匀、光滑、无流痕	(c)

加工材料：Cr12MoV；电解液：低浓度 $NaNO_3$，侧流供液；脉冲参数：频率 1.25 kHz，宽度 450 μs

1.2　低频、宽脉冲电流电解加工

1.2.1　加工效果

虽然低频宽脉冲电流的脉冲效应不够强，但较直流电解加工的精度和表面质量已有明显的提高和改善，显示出了脉冲电流的巨大潜力。

1）提高加工精度　在各种模式的低频、宽脉冲电流电解成型加工中，以周期供脉冲电流，周期进给的模式加工精度最高，这是由于它确保了小的加工间隙以及大间隙冲刷带来的良好的去极化和散热条件。前苏联最早采用此模式，据统计，其成形精度可以从直流加工的 0.15 ~ 0.30 mm 提高到 0.10 ~ 0.15 mm（见表 4.2-26）。我国采用连续供给脉冲电流、连续进给的模式加工钛合金叶片时，加工精度也从直流、混气电解加工的 0.30 mm 提高到 0.15 ~ 0.20 mm。

由于散蚀能力的下降，采用低频、宽脉冲电流进行电解打孔或电解套二维柱面时，其侧面的锥度误差有所减小，如表 4.5-2 所列。

在脉冲电流加工中，由于集中蚀除能力的提高使整平比提高，导致遗传误差减小，这点对于由模锻的毛坯电解加工零件显得更加重要。例如用低频宽脉冲电流加工 TC11 钛合金叶片，其最大整平比从直流加工时的 0.33 提高到 0.75，总加工误差从直流混气加工的 0.30 mm 减小到 0.15 mm。由于整平比的提高就放宽了对模锻毛坯的精度要求，例如上述钛合金叶片毛坯余量变化范围就放宽到 0.25 ~ 1.3 mm。同样，整平比的提高还可以解决余量小、且余量差较大的型面加工难题，例如某精密铸造的镍基合金涡轮叶片毛坯余量分布为：低点仅 0.10 mm，而高点达 1.1 mm；用直流电解无法将如此大的余量差整平，加工不出合格叶片；用手工抛磨又极其困难；而采用低频、宽脉冲电流电解加工此类叶片，就能够将如此余量分布的叶片型面整型，加工后达到设计要求。

表 4.5-2　侧面锥度及底面质量对比

加工类型	工件材料	侧隙/mm	侧锥/mm	底面质量
PECM	1Cr18Ni9Ti	0.15	< 0.05	无流纹，坚固黑膜，R_a0.8 μm，平面度 0.01 mm
	45 钢	0.20	< 0.02	无流纹，R_a1.6 μm，平面度 0.01 mm
DECM	1Cr18Ni9Ti	0.25	0.075	流纹严重，白色光亮，平面度 0.08 mm
	45 钢	0.30	0.075	流纹深 0.06 mm

注：其他条件：10% $NaNO_3$ 电解液，加工深度 10 mm；Δb = 0.10 mm；t_p = 12 ms；t_0 = 36 ms

2）改善表面质量　由于脉冲电流引发流场的改善而减少了加工表面的疵病，并得到较好的表面粗糙度，加工及试验结果参见表 4.5-1 及表 4.5-2。

1.2.2　应用实例

低频、宽脉冲电流电解加工在前苏联和我国的中、小叶片，模具，小孔加工中得到部分应用，前苏联以周期供给脉冲电流，周期进给的模式为多，而我国则较多采用连续供给脉冲电流、连续进给的模式。表 4.5-3 列举了一些应用的实例。

表 4.5-3　低频脉冲电流电解加工应用实例

项目	叶片型面加工			锻模型腔加工		深孔加工
加工零件	压气机叶片	精密铸造涡轮叶片	汽轮机叶片	小型精密模具	连杆锻模	涡轮后轴润滑孔
材料	TC11	K5	2Cr13		5CrNiMo	Inco718
尺寸/cm²	24.5	6.7 × 1.9	2.0 × 1.3	≤15	152	ϕ1.45
毛坯余量/mm	0.25 ~ 1.3	0.10 ~ 1.1	0.5 ~ 7.0		深度 19.8	孔深 70.1
加工精度/mm	0.15	0.20	0.20			0.25
加工表面粗糙度/μm	R_a3.2				R_a0.8	R_a6.3
进给及供电方式	连续进给，方波	连续、振动进给，方波	周期进给，脉冲供电	周期进给，脉冲供电	连续进给，局部正弦波	连续进给、方波
峰值电流/A	200 ~ 300			1 500		0.7 ~ 1.3 A/单孔
峰值电流密度/A·cm^{-2}	8 ~ 12			100		42 ~ 79
峰值电压/V	20 ~ 24	13	21	20	26	15
脉冲宽度/ms	40	18	3	1 ~ 2	8.33	50

续表 4.5-3

	叶片型面加工			锻模型腔加工		深孔加工
占空比	0.32	0.30	0.15	0.05 ~ 0.10	0.25	0.5
频率/Hz	8	17	工频	工频	30	8 ~ 11
加工间隙/mm	0.1 ~ 0.2	< 0.10	粗 0.15 精 0.09		0.7	
进给速度/mm·min⁻¹	0.30	0.30	0.28			0.5 ~ 1.0
电解液	6% $NaNO_3$ + 3% NaCl	4% $NaNO_3$ + 4% NaCl	7% NaCl	NaCl 或 $NaNO_3$	6% $NaNO_3$ + 2% NaCl	
电源	SCR 方波 2 000 A	SCR 方波 1 000 A	正弦波脉冲	正弦波脉冲	局部正弦波 5 000 A	SCR 方波 1 000 A
应用单位	625 所，170 厂	625 所，120 厂	俄罗斯	俄罗斯，合肥工业大学		国内 625 所、410 厂有类似应用
图号	4.5-5	4.5-6		4.5-7	4.5-8	4.4-32

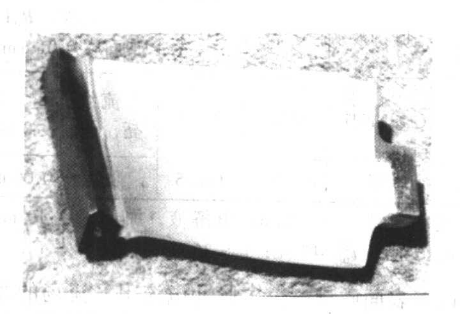


图 4.5-5 钛合金压气机叶片

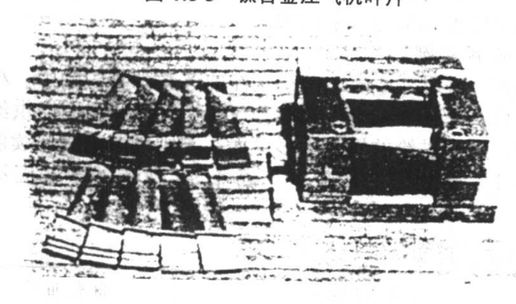


图 4.5-6 精铸涡轮叶片

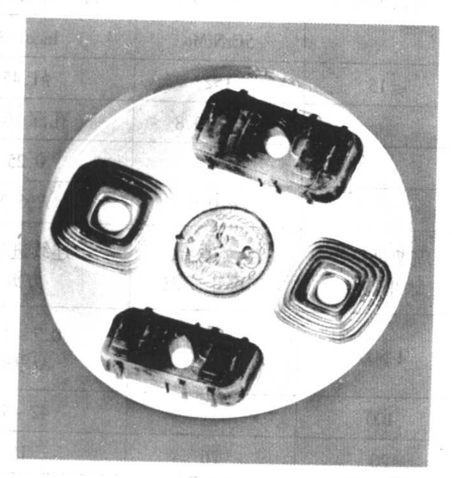


图 4.5-7 脉冲电流加工的型腔试件

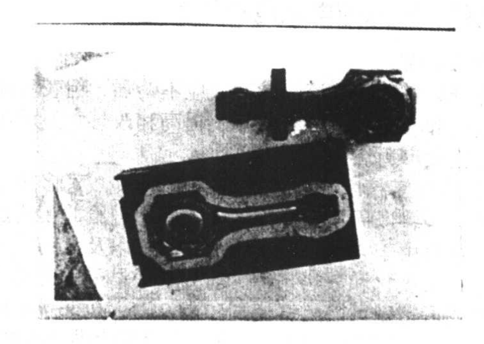


图 4.5-8 连杆锻模

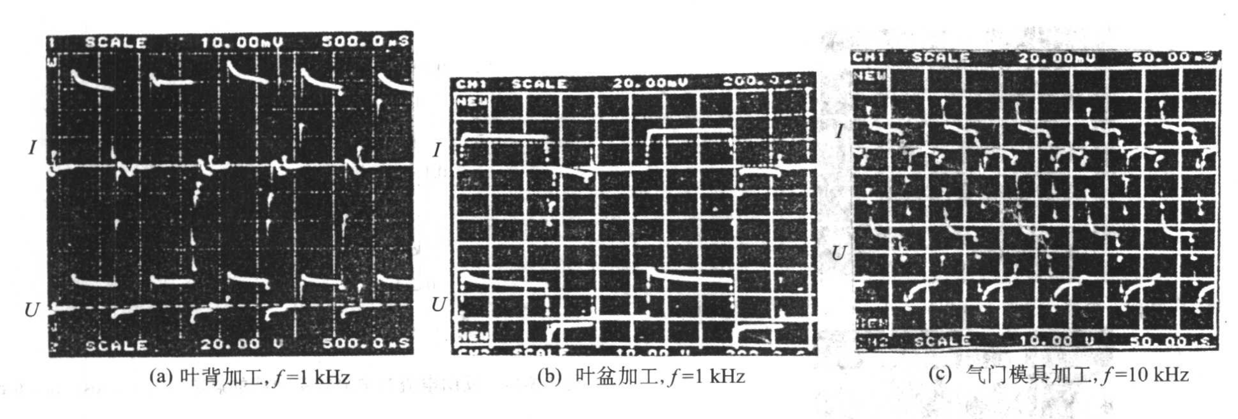
1.2.3 目前存在的问题

低频、宽脉冲电流电解加工虽有上述效果，但由于其脉冲效应不够强，未能充分发挥出脉冲电流电解加工的潜力。加工精度虽然比直流加工有所提高，但仍不能满足精密加工的需要，特别是加工效率较低。虽然采用周期通过脉冲电流、周期进给的加工模式能得到较高加工精度，但去除速度又较低，只有 0.05 ~ 0.10 mm/min；而连续通过脉冲电流，连续进给方式虽然加工速度稍高，但加工精度又不够高；配以周期进给、振动进给等方式，其运动机构又较复杂，而且频率也有限。由于上述诸原因，低频、宽脉冲电流电解加工还未能广泛应用于生产。

1.3 高频、窄脉冲电流电解加工

为了解决低频、宽脉冲电流加工中存在的问题，充分发挥出脉冲电流在电解加工中的潜力，使脉冲电流电解加工的技术经济效果有一全面的、较大幅度的提高，以期能在生产中推广应用，20 世纪 90 年代国外对高频、窄脉冲电流电解加工（取英文第一个字母，缩写成 HSPECM）进行了较多的基础性试验研究，国内华南理工大学与北京航空工艺研究所，在与英国爱丁堡大学合作研究的基础上，又进行了多方面的工艺试验研究以及部分产品的试验加工（加工电流、电压波形如图 4.5-9 所示），已获得较高的综合技术经济效果。现已研制出 1 000 A、2 000 A 高频、窄脉冲电源及机床，并已开始转入工程应用。本节将对此进行较为详细的阐述。





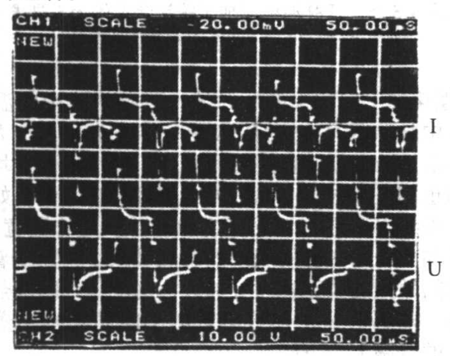
(a) 叶背加工, f=1 kHz　(b) 叶盆加工, f=1 kHz　(c) 气门模具加工, f=10 kHz

图 4.5-9　几种零件加工时的波形

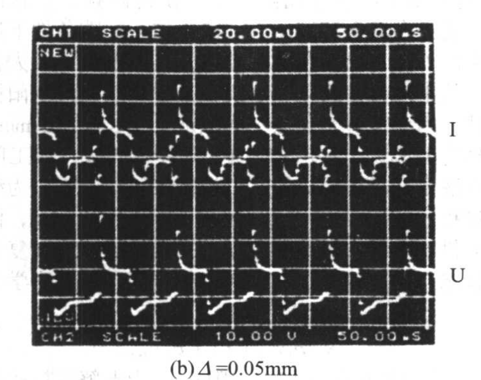
1.3.1　高频、窄脉冲电流引发的间隙过程物理、化学特性的新变化

基础试验研究揭示了高频、窄脉冲电流更大程度地改善了间隙过程的流场、电场及电化学特性，具体地体现在下列几个方面。

1）高频脉冲的脉间出现强反向电流　试验研究表明，采用 MOSFET 脉冲电源、当频率提高到 1 kHz 以上时，在脉冲电流关断时出现的短时反向电流显著地强化，而且随脉冲频率的提高、加工间隙的减小、以及正向电流的加大，反向电流将增大（参见图 4.5-10）；当频率达到 10 kHz 时，反向电流最为显著。



(a) Δ=0.2mm



(b) Δ=0.05mm

图 4.5-10　不同极间间隙下反向电流波形

2）微小间隙处发生微火花放电　试验表明，微小间隙条件下的高频、窄脉冲电流电解加工，在一定工艺条件下会发生微细火花放电现象并产生电解/电火花复合光整加工效应，其对应加工表面见图 4.5-11。图 4.5-12a 为微火花放电引起的电压高频振荡波形，图 4.5-12b 为微小火花放电时延时击穿的电压、电流波形。当最小间隙处发生微细火花放电时，就可能击穿在电化学溶解过程中、在工件阳极表面上所形成的钝化膜。表 4.5-4 列出了在相同电解液组成和相同加工电压条件下，有微火花比无火花时的加工间隙、加工电流都大，这就说明有微火花时间隙等效电阻更小、存在微火花击穿阳极膜而具有去极化效应。这种效应更加速了小间隙处的阳极溶解过程，从而强化了 $\eta\omega$-Δ 曲线（图 4.5-13）的非线性效应。若视 ω 为常数，则 $\eta\omega$-Δ 曲线与 η-Δ 曲线有着相同的形状，故可以借用图 4.5-13 分析 η-Δ 变化趋势：当 Δ 增大到 0.10 mm 之后，$\left|\frac{d\eta}{d\Delta}\right|$ 值急剧加大，η 急剧下降，很快接近于零，即出现截止加工状态；由图 4.5-13 得到，其截止加工间隙约为 0.20 mm。这样小的截止加工间隙非常有利于提高整平比、提高复制精度。

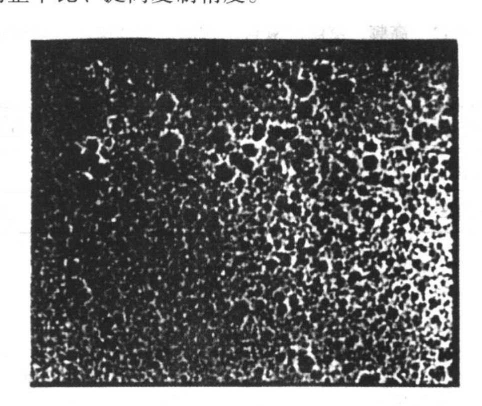
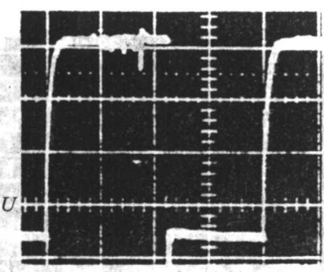
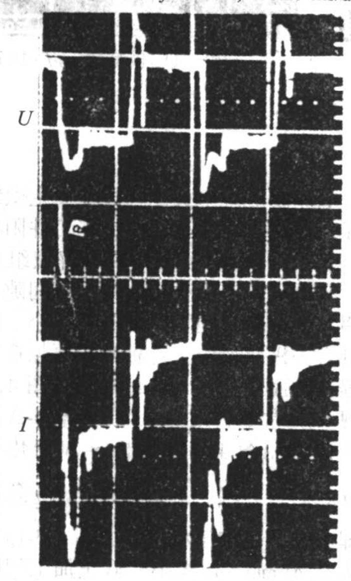


图 4.5-11　复合光整加工试件表面的扫描电镜照相，放大倍数 ×630

3）强化了电流效率曲线的非线性特性　脉冲电流源产生的脉间反向电流起到了去极化的作用，加速了对上一脉冲周波中阳极表面钝化产物的活化过程，提高了阳极表面的活化程度，延迟了下一周波进入钝化状态的时间，导致阳极超电位的上升期推迟出现，因而使随后的超钝化过程亦推迟到较高的电流密度区域，导致电流效率曲线进一步右移，如图 4.5-14 所示。因反向电流随频率提高而加大，上述脉冲效应也随着频率提高而相应加强。因而使前述的低频、宽脉冲电流加工模具钢中的非线性特性在高频时进一步强化。另一方面，毛坯加工面上最大余量处对应的加工间隙最小，其电流密度高，如前所述，这个区域的反向电流也应最大，其去极化效应也就最强，蚀除速度提高，而前述的小间隙处微火花放电击穿阳极钝化膜的作用也使这个区域蚀除速度提高。上述两种因素均导致高频、窄脉冲电流的阳极溶解的集中蚀除能力大为加强。



(a) 静液加工不锈钢平面 f=1 kHz,X: 0.25 ms/div;Y: 2.5V/div



(b) 正流式中工气门模具 f=10 kHz,X: 0.50 ms/div;Y: 10V/div

图 4.5-12　高频、窄脉冲复合光整加工时的电压、电流波形

表 4.5-4　不同间隙状态下参数对比

间隙状态	流态	电压/V	间隙/mm	电流/A
微火花	静态	12	0.10	2.2
无火花	流动	12	0.08	2.0

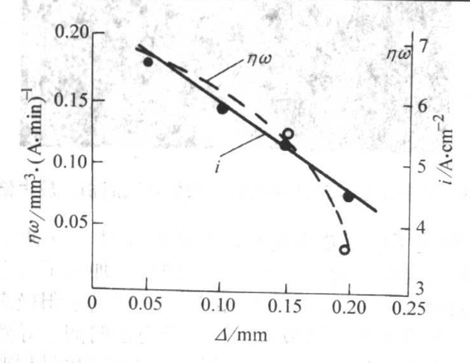


图 4.5-13　高频窄脉冲静液光整加工中的 $\eta\omega$-Δ 曲线

试件材料：1Cr18Ni9Ti；电解液：$NaNO_3$，比密度 1.006；

脉冲参数：电压 11 V；f = 1.25 kHz；t_p = 450 μs；D = 0.56

高频、窄脉冲电流导致 η-ω 曲线的非线性特性的另一新的变化是在活性电解液中加工耐热合金、钛合金时亦出现了这种非线性特性，且随脉宽的变窄而加强，在脉宽小到数十微秒时最为明显，而在直流加工耐热合金及钛合金中，这种非线性特性并不存在。在低频宽脉冲时亦不明显。图 4.5-15 是前苏联研究人员在 NaCl 电解液中加工镍铬高温合金时得出的结果。在钝性电解中也有类似的试验结果。这个特性对航空发动机叶片的电解加工有积极作用。

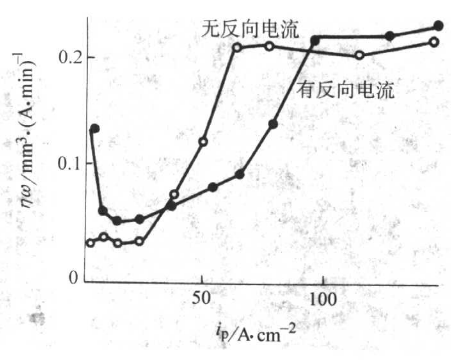


图 4.5-14　反向电流对电流效率曲线的影响（t_p = 2 ms；t_0 = 6 ms）

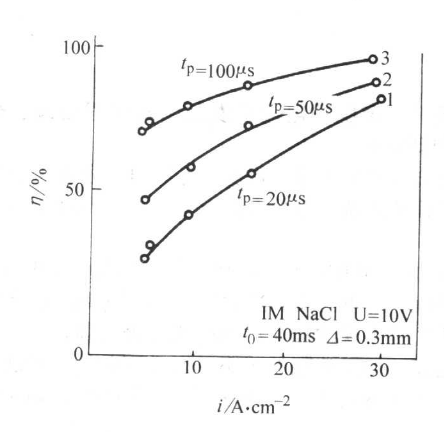


图 4.5-15　窄脉冲电流加工镍铬合金的 η-i 曲线

加工材料：KhN77TYuR（前苏联牌号）

4）强化加工间隙中的压力波，改善间隙中的温度场

加工间隙中脉动压力波的前沿变陡，频率和强度加大，对加工间隙中电解液的搅拌作用更为强烈，使流场更加均匀，去极化作用也相应加强，小间隙处电解液的充填性更好。

另一重要因素是间隙温度场的改善。随着脉宽的减少，占空比的加大，每一脉间周期的发热量减小，而随着频率的增加，脉间散热的频繁程度又加大，这就导致间隙热平衡温度的下降，电解液在发热最厉害的小间隙处发生蒸发，沸腾、空穴的概率大为下降。

5）稳定加工的最小间隙变窄，使得高频、窄脉冲电流电解加工能够在低电解液压力、微小加工间隙条件下进行

上述间隙压力场、温度场的改善以及反向电流、微火花放电的产生，从不同方面改善了小间隙处的加工条件和阳极蚀除的稳定性，因而能够实现微小间隙加工（$\Delta \leqslant 0.05$ mm）。

在理论上 Kozak 基于其他加工条件相同时，加工间隙越小，电解液温升越大的规律，以控制电解液沸腾作为维持稳定加工过程的极限，进行了简化条件的热力学计算，假设下一个脉冲供电之前，极间间隙中理、化性能完全恢复到初始的新鲜状态。据此建立了允许最小加工间隙的热力学公式

$$\Delta_{min} = \sqrt{\frac{\alpha_T \kappa_0 \ (U_0 - \delta E) \ U_0}{\rho_1 \ c_1 \ln \ (1 + \alpha_T \theta_{boil})} t_p}$$

式中，Δ_{min} 为允许的最小加工间隙；α_T 为电解液初始温度时电导率的温度系数；κ_0 为初始温度时电解液入口处电导率；U_0 为峰值电压；δE 为阳极与阴极电极电位值总和；ρ_1 为电解液密度；c_1 为电解液热容；θ_{boil} 为间隙条件下电解液沸点与初始温度差。

虽然上式忽略了电解液流速和极化等其他因素对最小稳定加工间隙的重要影响，但仍然能从温度场这个重要因素看出允许的最小加工间隙相对脉宽的变化规律，如图 4.5-16 所示。此规律说明窄脉冲改善了热平衡条件，提高了产生沸



腾的最大电流密度极限，从而也缩小了相应的可允许的最小间隙极限。从图中还可看出当脉宽小到 500 μs 以内时，稳定加工的最小间隙 Δ_{min} 随脉宽变窄而减小的速度越来越快的趋势。

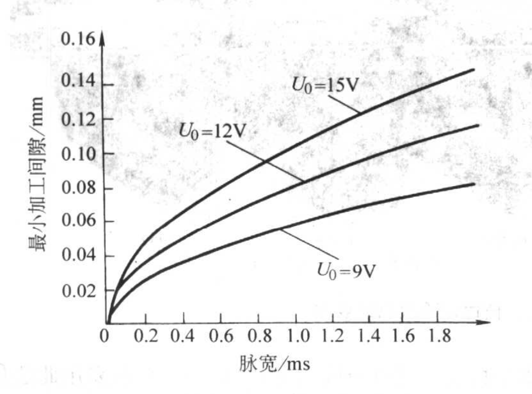


图 4.5-16　最小加工间隙与脉宽的关系

实践上，在型腔和型面的工艺试验中亦实现了微小间隙的加工，还显示出间隙随频率、脉宽而变化的规律。例如在叶片加工试验中，稳定加工的最小间隙随着频率的提高、脉宽的变窄而缩小，在 10 kHz 时可小到 0.04 mm，如表 4.5-5 所示。在气门模具型腔及刻字工艺试验中，最小稳定加工间隙也在 0.05 mm 以内。

表 4.5-5　频率对最小加工间隙的影响

电源类型	SCR（DC）	MOSFET（PECM）	
电压/V	14.4	16	15
电流/A	132	峰值 184	峰值 170
频率/Hz	DC	1 k	10 k
脉宽/μs		500	50
占空比		0.5	0.5
最小加工间隙/mm	0.10	0.07	0.04

注：试件：镍基耐热合金叶片；电解液：低浓度 $NaNO_3$ + NaCl；p_1 = 0.5 MPa。

6）阳极溶解的集中蚀除能力显著提高，使其溶解过程接近定域溶解　间隙进一步缩小使得 $|di/d\Delta|$ 显著加大，电流密度也随之显著提高（图 4.5-17），这就导致电流分布高度集中在间隙最小、也就是毛坯余量最大处，因而显著提高了集中蚀除能力。

在小间隙处，反向电流具有更强的去极化效应；微火花放电也具有击穿阳极钝化膜的作用；以及小间隙处电流效率曲线进一步非线性化；都从不同方面提高了高频、窄脉冲电流阳极溶解过程的集中蚀除能力。而从另一方面看，也就是降低了散蚀能力，使其溶解过程越接近定域溶解。试验研究表明，随着频率提高，脉宽变窄、占空比减少，均导致集中蚀除能力增强、散蚀能力降低。这在叶片工艺试验结果中也得到证实。图 4.5-18 展现了叶片型面蚀除区的变化，证明了随着脉冲频率提高，型面加工越来越集中到余量最大处。图 4.5-19 展现了电解加工后的棱边蚀除状况，随着加工电流脉冲频率的提高而更清晰，说明脉冲频率提高而使杂散腐蚀减小的规律。

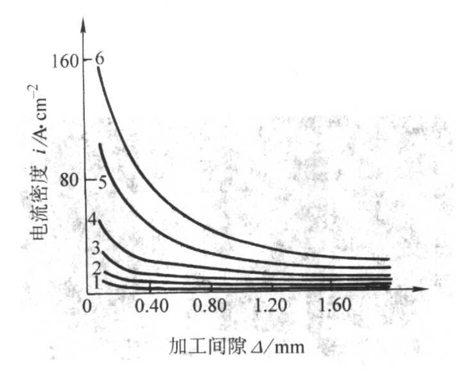


图 4.5-17　电流密度－加工间隙曲线

加工材料：1Cr18Ni9Ti；
电解液：NaCl；浓度：曲线 1、2、3—0.2 mol/L，曲线 4、5、6—2 mol/L；
脉冲宽度：220 μs；脉冲电压：曲线 1、4—10 V，
曲线 2、5—20 V，曲线 3、6—30 V

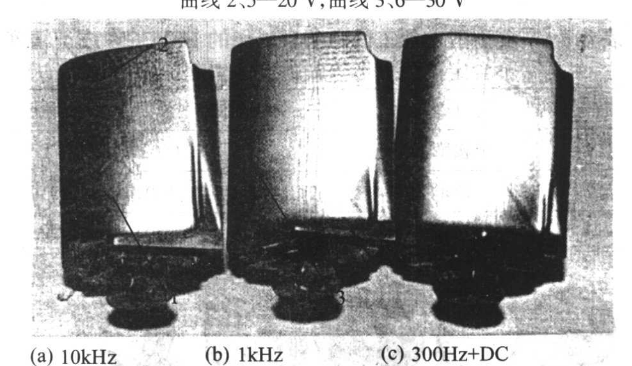


图 4.5-18　不同频率脉冲电流加工时集中蚀除型面区的变化

1—蚀除区；2—未蚀除区；3—流痕

1.3.2　HSPECM 的加工效果

（1）加工精度有较大幅度的提高

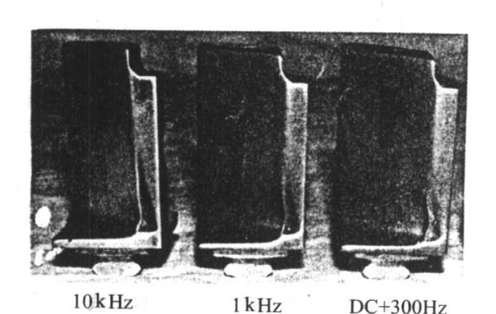
如前所述，HSPECM 显著提高了阳极溶解的集中蚀除能力，实现了微小间隙的加工，较好地解决了直流电解加工精度中两个最根本的问题，因而较大幅度地提高了电解加工的精度，使电解加工有望从一般加工跨越到精密加工领域。

1）尺寸加工的成形精度显著提高　如表 4.5-6 所示，HSPECM 自身的成形精度及尺寸重复精度均可控制在 0.05 mm以内。较直流电解加工的 0.15～0.30 mm 有显著提高。

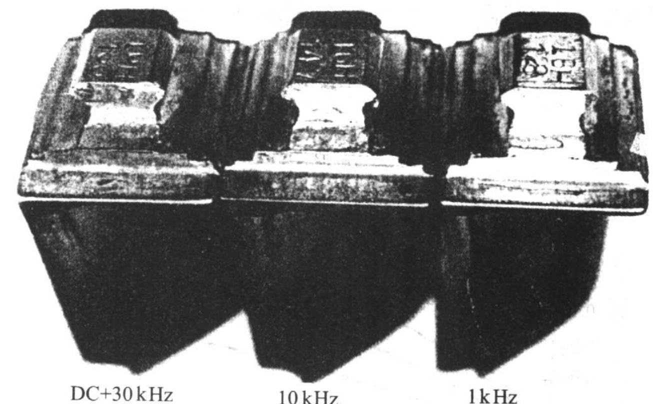
2）HSPECM 可用于光整加工并能提高光整加工精度　试验研究还表明，高频、窄脉冲电流光整加工不仅可以降低表面粗糙度，而且还能提高加工精度，如表 4.5-7 所示，在电火花加工后进行的高频窄脉冲电解加工与微细电火花（Micro－spark Machining，MSM）复合光整加工（HSPECM/MSM），将型腔的重复精度从 0.12 mm 提高到了 0.025 mm。

3）加工精度在一定范围内随频率提高，脉宽变窄而进一步提高　表 4.5-8 列举了频率对加工精度影响的试验结果，显示了随频率提高、脉宽变窄，加工精度相应提高，这与前述的随着频率提高、脉宽变窄而加工间隙减小，集中蚀除能力提高的规律一致。

4）棱边锐度提高，非加工面杂散腐蚀减小。飞利浦公司近年已成功地采用此项新技术，建成大量生产的全自动流水线，加工全方位贴面电动剃须刀片的小孔、成形窄槽和薄壁内外球面。其技术经济效果显著，加工精度高，尤其可贵的是能得到锐利的孔边和槽边，这在传统直流电解加工中是无法做到的。采用电解加工使原有流水线的数十个工序减少到现有的 4 个工序，且工具阴极不损耗。



(a) 缘板加工面棱边



(b) 缘板非加工面棱边

图 4.5-19　不同频率脉冲电流加工时，棱边蚀除状况的变化

表 4.5-6　典型型腔加工试验所反映出的 HSPECM 成型精度
（不含定位、变形等其他因素引起的误差）/mm

序号	试验件	试件图像	圆度	重复精度
1	半腰膨形型腔	图 1	0.025	0.025
2	锥形型腔	图 2	0.02	0.03
3	气门锻模模拟试件	图 3	0.02	0.045

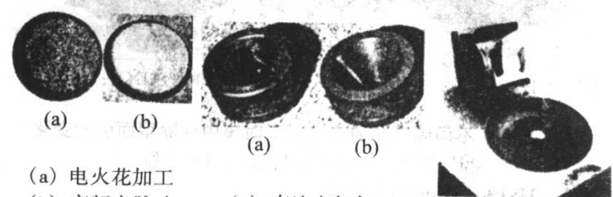

(a) (b)
(a) 电火花加工
(b) 高频窄脉冲电解加工

图 1　半腰膨形型腔

试件 1Cr18Ni9Ti
电解液 $NaNO_3$ Y1.006
f10kHz；t_p50 μs
$\Delta < 0.05$ mm

(a) (b)
(a) 直流电解加工
(b) 高频率脉冲电解加工

图 2　锥形型腔试件

试件：3Cr2W8V
电解液 12% $NaNO_3$ + 2% $NaClO_3$
$\Delta = 0.10$ mm

图 3　气门锻模模拟试件

试件：1Cr18Ni9Ti
电解液：7% $NaNO_3$ 正水
f10 kHz：t_p50 μs；
$\Delta < 0.05$ mm

表 4.5-7　高频、窄脉冲复合光整加工精度 mm

加工类型	加工尺寸		最大圆度	重复精度	
	X 向直径	Y 向直径		直径	深度
HSPECM/MSM	14.5 – 14.07	14.05 – 14.075	0.025	0.025	0.015
EDM	13.88 – 14.00	13.90 – 14.00	0.03	0.12	0.02

注：加工材料：1Gr18Ni9Ti；电解液：超低浓度 $NaNO_3$，静液。

(2) 表面质量进一步改善

随脉冲频率的提高、脉宽的变窄，表面质量也明显改善。例如从图 4.5-18、图 4.5-19 侧流式加工叶片中能明显地看到，随频率提高、脉宽变窄，表面流痕减弱以至消失。试验还表明，在正流式加工型腔时也呈现相同的规律，直流加工时其底部有明显的放射形流痕，用 1 kHz 脉冲电流加工时显著减少，而提高到 10 kHz 时底部流痕基本上消失。表 4.5-6 中图 2 之 (a)(b) 对比则显示了在相同条件下，采用高频、窄脉冲电流加工，表面疵病可完全消除，表面粗糙度亦随脉冲频率的提高、脉冲宽度的变窄而相应下降。试验结果还表明，优化工艺条件，高频、窄脉冲电流复合光整电解加工的表面粗糙度可降低到 R_a0.20 μm。日本采用此法作为电火花加工型腔的后续光整加工工序，达到了镜面光度。

表 4.5-8　不同频率下加工精度对比

f/kHz	t_p/μs	i_p/A·cm^{-2}	U_p/V	M/mm	L/mm	重复精度/mm
10	50	26.6 ~ 30	11.3 ~ 11.5	6.44 ~ 6.46	10.15 ~ 10.17	0.02
1.25	450	40 ~ 41.7	15.8	6.52 ~ 6.58	10.15 ~ 10.18	0.06
示意图						

（示意图中标注：L，M）

注：电解液：$NaNO_3$，$p_1 = 0.4$ MPa，$\Delta = 0.05$ mm。

(3) 加工效率提高

比较低频、宽脉冲电流，高频、窄脉冲电流电解加工的效率有较大提高。其主要原因如下。

1) 由于采用高频、窄脉冲电流实现了微小间隙的加工。如前所述在微小间隙区（$\Delta \leqslant 0.05$ mm）电流密度得到大幅度的提高，在型腔、型面加工中可以高达 150 A/cm^2 以上（见图 4.5-17）。一般采用 0.5 左右的占空比，则电流密度的提高可以大于 1 倍以上，因而平均电流密度有可能高于直流加工的电流密度，这样其平均蚀除速度就有可能大于直流加工的蚀除速度，在某型叶片的加工试验中，最高进给速度达到 0.4 mm/min，已高于直流加工时的 0.3 mm/min。

2) 反向电流的影响。由于反向电流加速了脉间去极化的过程，因而在同样条件下可选用更短的脉冲间隔进行加工，这就导致平均电流密度大幅度提高，同时也导致电流效率提高，综合结果使进给速度也大幅度提高（见图 4.5-20）。

3) 集中蚀除能力的强化、整平比的提高，使电流有效利用率提高，从而整平过程缩短，相应工件的整个加工时间也缩短，加工效率提高。

(4) 加工稳定性提高，工艺简化，易于推广

由于流场的改善，加工过程稳定性显著提高，钝化结疤、短路烧伤的机率极小。又由于实现了微小间隙的加工，因而工艺参数的误差对加工间隙影响较小，即所谓“参数影响率”较低，这就放宽了对其他工艺参数控制精度的要求，



特别是降低了直流小间隙加工时对高电解液压力和流速的要求，也就放宽了对设备自动控制系统和输液系统的技术要求，还降低了对操作者经验上的高要求，设备成本也相应降低。微小间隙加工的实现以及截止加工间隙的减小，使加工间隙趋于均匀，导致阴、阳极型面的一致性显著提高，给出了工具阴极 CAD/CAM 的现实性，因而有望简化工具阴极的设计和制造工作量，有利于缩短工具阴极的生产准备周期、降低制造成本，从而有利于电解加工从批量生产向单件或小量生产发展。在已有的直流电源基础上，增加一斩波器，利用现成的设备进行少量改装，即可应用此项新技术，有利于在现有生产中推广应用。

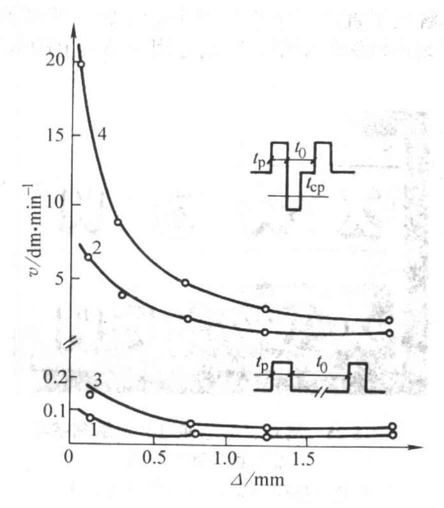


图 4.5-20 反向电流、小脉冲间隔与大脉冲间隔、无反向电流时加工速度的比较

1—$t_p=20\ \mu s$，$t_0=40$ ms；2—$t_p=20\ \mu s$，$t_0=40\ \mu s$；
3—$t_p=80\ \mu s$，$t_0=42$ ms；4—$t_p=80\ \mu s$，$t_0=40\ \mu s$。
1、3—无反向电流；2、4—有反向电流，周期为 T_{cp}；
电解液：1、2—$NaNO_3$，2、4—NaCl（浓度均为 1 mol/L）；
加工材料：高温铬镍合金

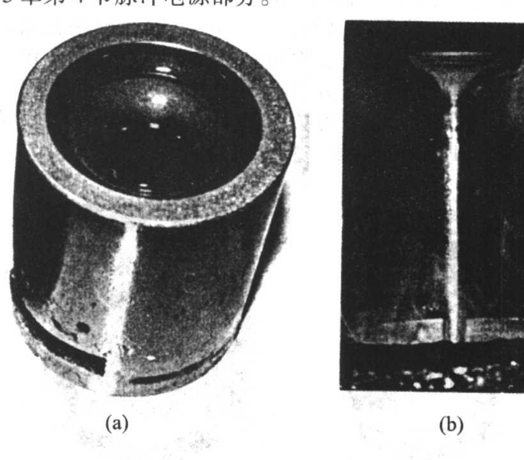
上述诸因素均有利于电解加工更广泛的应用。因直流电解加工近 20 余年来的发展迟缓，其重要原因之一就是工艺过于复杂、加工稳定性不够、工具阴极设计、制造较复杂，而高频、窄脉冲电流电解加工正好可以较好地改善这些直流电解加工的弱点，使电解加工得到进一步的发展和应用。

1.3.3 HSPECM 用于生产的可行性——典型产品加工试验结果

目前已进行了多种有代表性的产品加工工艺性试验，证实了高频、窄脉冲电流电解加工可应用于制造产品的可行性、实用性，也验证了前述基础试验的重要结论。

(1) 模具型腔

对气门模具进行了较系统的工艺试验，包括模具模拟试验件和正式模具的加工工艺试验，以及采用正式模具模锻气门锻件。所加工的模具及试验锻打的气门锻件见图 4.5-21。试验中采用新研制的 MOSFET 高频、窄脉冲电源，其性能见第 3 章第 4 节脉冲电源部分。

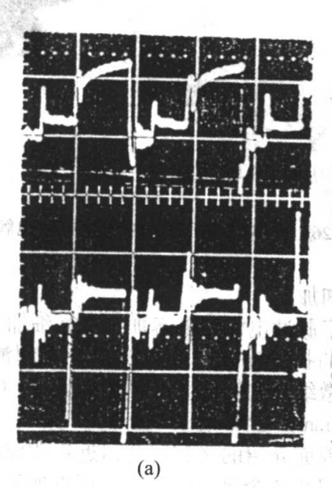


(a) (b)

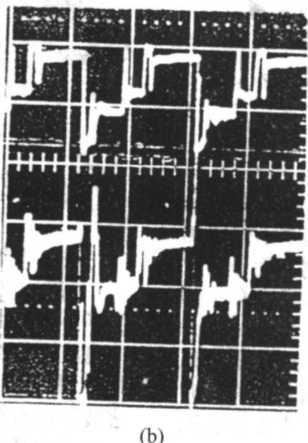
图 4.5-21 试验加工的气门模具

(a) 加工的模具：$NaNO_3$ 电解液，$f=10$ kHz，$t_p=50\ \mu s$；(b) 试锻打的锻件

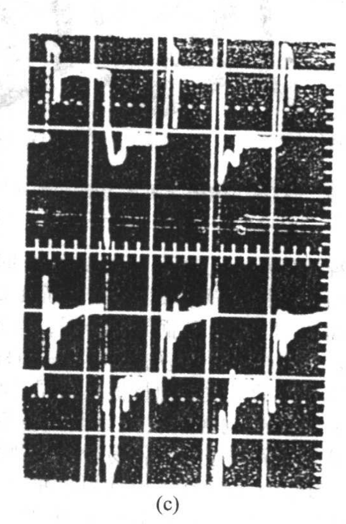
模拟试验件为缩小尺寸、简化形状的气门型腔模拟件（见表 4.5-6 中图 3），材料为 1Cr18Ni9Ti。图 4.5-22 即为模具加工初始、中间、终结时的电压、电流波形。优选的脉冲参数为 $f=10$ kHz，$t_p=50\ \mu s$，$D=0.5$，$i_{max}=52\ A/cm^2$，电解液为 3%～5%$NaNO_3$ 溶液。电解液流动方式采用正流式与反流式两种类型进行对比试验。电解液压力为 0.5MPa。初始加工间隙为 0.10 mm，平衡间隙在 0.05 mm 之内。试验获得了高精度（见表 4.5-6），高表面质量。无论采用正流式或反流式，加工表面均无直流加工中常见的流痕、点蚀、结疤等疵病，表面光滑、均匀。这也说明在高频、窄脉冲条件下放宽了对流动方式的要求，采用较为简单的正流式加工即可。



(a)



(b)



(c)

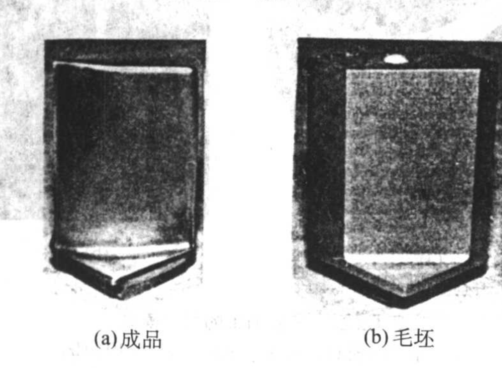
图 4.5-22 气门模具电解加工电压、电流波形

正式模具材料为3Cr2W8V，硬度为HRC48～52，电源同上，正式模具的工艺试验亦获得了高的加工精度和良好的表面质量。用此模具试生产锻造了近2 000件正式的气门锻件，全部合格，随后已加工出合格的气门成件。

（2）叶片型面

对某型航空发动机高压压气机叶片型面所进行的高频、窄脉冲电流电解加工工艺可行性试验表明，此项新技术可以较好地解决中、小尺寸，薄型，大扭角、大缘板的耐热合金精密叶片的加工难题，其主要结论如下。

1）试验证实了前述高频、窄脉冲电流对镍基耐热合金同样具有 ηi 的非线性特性，而使此类叶片的加工过程呈现出较强的集中蚀除能力（见图4.5-18），因而整平比得以明显提高，当毛坯最高点去除量达9 mm后，最低点仅去除0.40 mm，故可以直接从方料毛坯加工到最终型面尺寸（见图4.5-23）。试验中最小加工间隙达到0.04 mm。故此，有望使此类叶片获得更高的加工精度。



(a)成品　　(b)毛坯

图4.5-23　高频、窄脉冲电流电解加工小型精密叶片

叶片材料：镍基合金；电解液：低浓度 NaCl + $NaNO_3$；f = 10 kHz；t_o = 50 μs；$D \cong 0.5$；U = 16 V；I_{max} = 184 A；Δ = 0.04～0.07 mm；v = 0.33～0.40 mm/min

2）采用HSPECM可以通过阴极的斜向进给，在加工叶身型面的同时，也加工出较大面积的侧端缘板（见图4.5-24）。

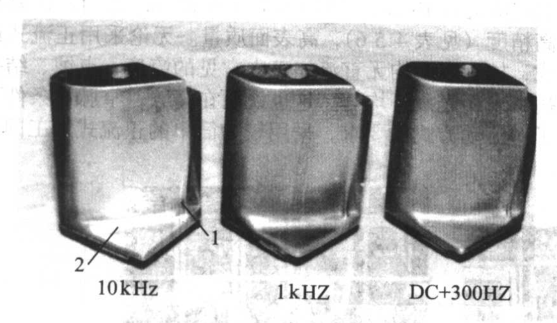


图4.5-24　不同频率下缘板端面及转接 *R* 蚀除情况对比

1—低台阶面；2—高台阶面

从图4.5-24可以看出当频率高达10 kHz时由于截止加工间隙变小，因而缘板端面上较低的台阶面1基本不蚀除而只加工高台阶面2，且1、2两面界限分明，直到型面最后成型时端面1去除余量仍很小，从图4.5-19a同样可以看出侧面斜度、即侧面电解的二次腐蚀量很小；同时叶型与缘板的转接R亦较小；这都说明频率提高后侧面整平比和复制能力相应提高，这样在斜向进给时就易于控制型面与端面同时达到最终尺寸，解决了直流加工或低频脉冲加工中型面达到最终尺寸时端面已过切（如图4.5-19a中的DC + 300 Hz所示）的难题。

3）采用10 kHz频率、50 μs脉宽的电源可以得到电痕、无锻造流纹的平滑、光整的表面，如图4.5-23a所示。

4）该试验最高进给速度达到0.40 mm/min，是低频脉冲电流、周期进给平均速度的3倍，也高于同一叶片直流加工0.30 mm/min的进给速度。数据表明，前述的高频、窄脉冲电流电解加工的效率不仅显著高于低频、宽脉冲电流加工，也有可能高于直流加工的结论正确。

（3）刻字

图4.5-25为直流电解刻字与1 kHz、500 μs脉冲电流电解刻字的试件对比，前者字型不完整，特别尖边转角处有明显的缺损，加工复制性较差。后者字型完整、轮廓清晰、复制性好。此外电解刻字的字型高度较激光刻字的大，其效率显著高于电火花刻字，且阴极不损耗，因而采用高频、窄脉冲电流源解决了直流刻字中字型不够完整、清晰的问题后，有望用于刻蚀较深的字型，特别是用于模具上的刻字。

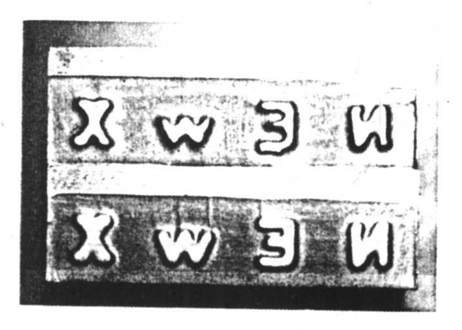


图4.5-25　高频、窄脉冲电流电解刻字与直流电解刻字的对比

（上为直流加工，下为脉冲加工）

（4）光整加工

图4.5-26是为英国某工厂进行的阀体型腔光整加工试验件。型腔经电火花预成型。直接用其电极在20% $NaNO_3$ 电解液中进行高频、窄脉冲电流光整加工。表面均匀、细腻、光整，效果良好。



(a)光整加工的型腔　　(b)阴极

图4.5-26　阀体型腔高频、窄脉冲电流电解光整加工

（5）微细加工

高频、窄脉冲电流为电解加工在微细加工领域的应用提供了一条新的技术途径。图4.5-27为飞利浦公司微秒级脉冲电流加工微细孔的实例。其精度高达±0.001 mm。加工间隙小到0.02 mm，电流密度高达200 A/cm^2，电解液为 $NaNO_3$ 溶液。还有前面介绍的飞利浦公司近年建成的加工全方位贴面电动剃须刀片的全自动生产线，可以加工出无毛刺、有锐边的小孔、窄槽，这用传统的直流电解加工中是无法做到的。



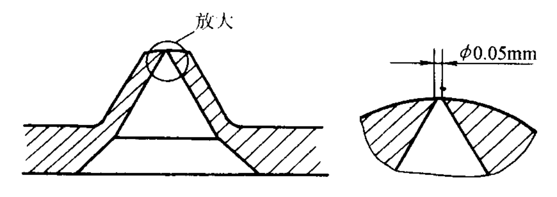


图 4.5-27　窄脉冲电流加工微细孔

近些年来，脉冲电流微精电解加工的研究取得了新的进展。如德国弗里茨·哈贝尔研究所开发了微细电解刻蚀技术，研制了纳秒级超短脉冲电源，以铂丝作工具阴极，采用硫酸铜和高氯酸混合的复合电解液，成功地实现了纳米尺度去除金属材料，加工精度可达几百纳米，已经刻蚀了微型机械元件，还可进行纳米尺度的切割，其发展和应用还在继续深入研究。

1.3.4　综合技术经济效果分析

高频、窄脉冲电流电解加工可以获得较高的技术经济效果，即加工精度高，表面质量好，加工过程稳定，效率高，成本低。有关加工精度、表面质量及加工稳定性等基本工艺技术问题，前面已作专题论述。以下将以气门模具的加工和试锻打气门锻件为例（加工流程见图 4.5-28），就生产效率、加工成本问题进行分析。

（1）生产效率提高

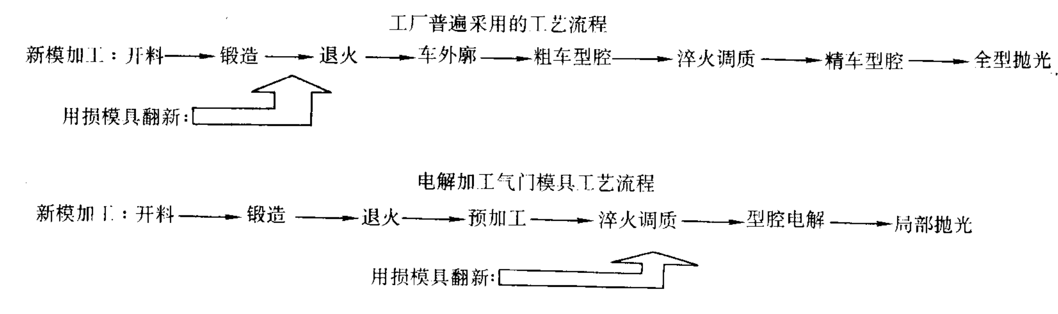


图 4.5-28　新、老气门模具工艺的流程图

1）加工工时减少　由于电解加工模具型腔是全型加工，就保证加工精度、表面质量而言，高频、窄脉冲电流电解加工可以满足气门精锻模的最终要求，因而型腔可以直接用淬硬的模块毛坯一次电解成型，故加工时间短。以气门模具为例，采用此法加工型腔总工时仅为工厂现用的数控车——手工抛光工艺（见图 4.5-28）的 1/5。又由于 HSPECM 的蚀除速度显著高于电火花成型加工，其表面粗糙度低，又无冷、热硬化层，后续抛光量亦少，所以同为一次全型加工，但 HSPECM 型腔加工工时仍小于后者。仍以气门模具为例，采用 HSPECM 加工一个型腔的工时仅为美国气门专业厂采用的四头电火花成型工艺的 1/7.6。

2）生产准备周期缩短　由于 HSPECM 加工模具时工序高度集中，以一个 HSPECM 工序代替了工厂现用工艺的从粗车到抛光共四道工序（参见图 4.5-28），因而其工艺装备的数量大减；又由于 HSPECM 的工具阴极型面非常接近工件的型面，因而可以采用 CAD/CAM 设计、制造，气门模具的工具阴极即采用了此法，其工作量显著小于传统电解所用的反拷、试加工修正的工艺。加之 HSPECM 工具阴极无损耗，使用过程几乎没有短路烧损，使用寿命长，不需像电火花成型及数控车那样频繁修复，更换工具电极/刀具。这些因素均导致生产准备周期短于数控车及电火花成型的准备周期。

3）生产周期缩短　由于 HSPECM 的工序高度集中，又无中间热处理的周转过程，因而生产周期短，以气门模具为例，其生产周期仅为工厂现行工艺的 1/6。模具制造周期的缩短对企业尽快占领市场有重大意义。

综上所述，高频、窄脉冲电流电解加工气门模具的生产效率显著高于电火花成型及数控仿形加工。

（2）加工成本降低

1）模具使用寿命大幅度提高，节约了大量零件成本中的模具折旧费　由于 HSPECM 加工的模具表面无冶金缺陷层，特别是没有显微裂纹，其高温疲劳强度及屈服强度高，锻造开裂、拉伤的机率大为减少。又由于表面质量好，无刀痕及点蚀坑，锻造过程材料流动阻力小，模具磨耗量低，锻造成型后出模速度快，模具受热时间短，延缓了模具表面回火软化过程。上述诸因素均导致 HSPECM 所加工的模具使用寿命大大高于切削加工及电火花加工的模具。以气门模具为例，用 HSPECM 加工的模具，其使用总寿命较工厂的现行的车削工艺的模具提高 5 倍以上，因而大大节约了模具的消耗量。

2）由于气门模具是批量生产，则电解加工的单件工时费、折旧费均低，而 HSPECM 还进一步降低了阴极工具的设计、制造费用。

上述诸因素均导致 HSPECM 加工模具的成本下降。以某气门件加工厂每年需求数万套气门模具估算，采用 HSPECM 工艺后，比较传统工艺，每年可节省模具费用一半以上。

综合而论，由于高频窄脉冲电流电解加工的加工精度高、表面质量好、加工过程稳定、生产效率高，成本低等方面的技术经济优势，使得其在精密加工领域具有更强的竞争力，从而促进电解加工技术的发展和应用，改变近 20 余年来电解加工发展迟缓的局面。

2　数控展成电解加工

通常电解加工，在加工型腔、型面时，大多采用成型阴极拷贝式电解成型加工。其加工速度快，以一个方向的简单送进运动就可加工复杂的型腔、型面；但成型阴极的设计及制造困难，且制造周期长；同时，由于阴极形状复杂、加工面积大，影响因素多，使得拷贝式加工的复制精度、重复精度都不太高。尤其对一些小直径、多叶片、窄通道整体叶轮的扭曲叶片型面加工，由于受工具阴极刚性及加工送进方式的限制，拷贝式成型电解更不能完成其加工任务。

为了解决上述问题，开始进行数控展成电解加工的研究。它类似于数控铣那样，以简单形状的工具阴极，按照计算机数控指令，进行必要的展成成型运动，基于电化学阳极溶解原理，以电解“切削”方式实现型腔、型面的加工（参见图 4.5-29）。

这一加工技术综合了电解加工与数控加工各自的技术长处，又克服了各自的不足。其工具形状简单，可以是棒状、球状，而“切削刃”则可为点、直线或曲线；它像数控加工那样具有很好的加工柔性，以不同类型的控制软件代替复杂的成型阴极设计制造，同时它又同普通电解加工那样，可以加工各种难加工材料，整个加工过程工具阴极无损耗，加工时没有宏观切削力，可以加工各种小刚性零件。展成电解加

工的成型规律更有其特殊性，其加工间隙已不是一般拷贝式成型电解加工时的平衡加工间隙，而是随着阴极的“切入”和“退出”加工区，相应加工间隙中的流场、电场和电化学溶解速度场均处于动态变化过程，故其成型规律不能完全用一般电解加工时的平衡加工间隙的结论来分析。特殊的流体动力特点和电化学阳极溶解特点，带来的明显优点是：整平能力更强、成型精度更高。本节将重点介绍其系统组成、成形规律、工艺特点和加工实例。

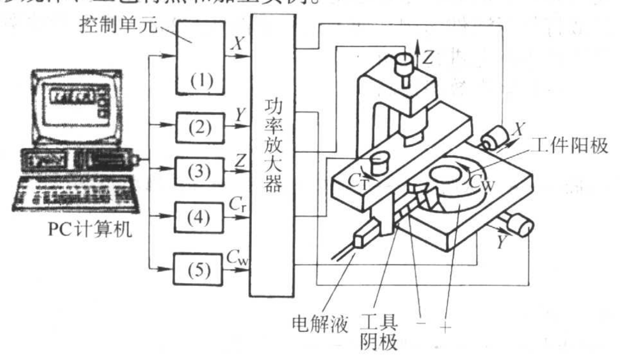
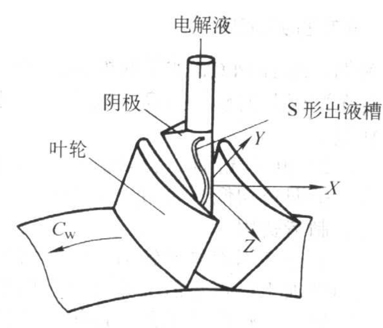


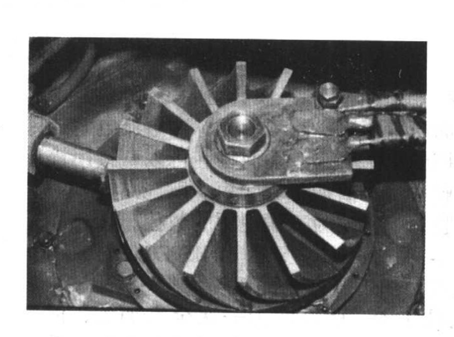
图 4.5-29　数控展成电解加工系统组成

2.1　数控展成电解加工系统组成

以整体叶轮扭曲叶片的叶间槽加工为例，带双直线加工刃的阴极相对于整体叶轮坯料呈一定位置安装，在计算机控制的数控系统驱动下，阴极及叶轮坯料作相对数控展成送进运动（图 4.5-30a），则阴极在叶轮毛坯上“加工腐蚀”出呈扭曲变化的叶间通道，阴极加工刃（直线）随数控展成运动所形成的包络面就构成了一个叶片的叶盆型面以及另一个相邻叶片的叶背型面（图 4.5-30b）。其加工系统由机床及数控系统两大部分组成（图 4.2-29），机床具有 X、Y、Z 三个坐标的直线位移以及工具阴极摆动 C_T、工件旋转 C_W 共五个坐标的运动。采用本加工系统，可以进行诸如整体叶轮等整体结构件的加工。该系统可实现自动编程，只要向主控计算机输入加工型面的型值点、工具阴极的几何结构参数以及包括加工间隙分布在内的主要加工参数，就可在计算机上完成加工型面的几何造型、阴极展成运动轨迹的生成、并后置处理成控制展成运动所必须的加工程序；再通过接口及相应传输软件将加工控制程序输入下级控制单元，控制四轴或五轴同步联动，进而实现扭曲叶间通道、叶片型面的展成电解或展成电解磨削加工。这在后将专题介绍。



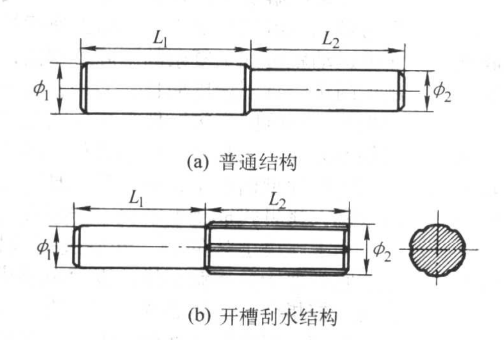
(a) 加工阴极及加工运动图解



(b) 加工实貌

图 4.5-30　数控展成电解加工整体叶轮的叶间通道

数控展成电解所采用的阴极根据“加工刃”的形式可分为点式和线式；根据向加工区供给电解液的方式又可分为外喷射式和内喷射式。图 4.5-31 为旋转棒状直线刃加工阴极，电解液供给多采用外喷射方式；图 4.5-32 为单直线刃加工的内喷射阴极；图 4.5-33 则为双直线刃式内喷射阴极，主要用于加工成型沟槽，如图 4.5-30 所示为加工整体叶轮的叶间通道。随后将就阴极主要类型、加工形式及成型规律进行论述。



(a) 普通结构

(b) 开槽刮水结构

(c) 加工示意

图 4.5-31　旋转棒状阴极及其加工示意图

2.2　旋转阴极展成电解加工

研究旋转阴极数控展成电解、特别是研究其加工成形规律，是研究数控展成电解的基础。直线刃阴极具有刃边圆角 R，故可以视为直径为 R 的圆棒阴极。因此，研究棒状旋转阴极展成电解所得到的一些规律，也可拓展应用于分析直线刃阴极展成电解加工的成形规律。

2.2.1　间隙特性

和普通电解加工一样，展成电解加工阴极与工件间的间隙大小及变化，均直接影响成型精度。基础机理性试验表明，它具有不同于拷贝式型面电解加工的间隙特性。如图 4.5-34 所表示的圆棒旋转阴极展成电解加工的几何模型，工



具阴极连续作展成运动对工件进行电解“切削”，随着工具阴极的“切入”和“退出”对应加工区，其加工间隙及相应的流场、电场、电化学溶解速度场都处在动态变化过程。在加工的开始时刻，初始间隙为 Δ_0、在相应角度 α_0 处先进行加工。随着阴极逐渐向下送进运动而切入试件，并逐渐扩大到至 $\alpha=\alpha_0+d\alpha, \alpha=\alpha_0+2d\alpha, \cdots\cdots, \alpha=\alpha, \alpha=\alpha+d\alpha, \alpha=\alpha+2d\alpha, \cdots\cdots$，直至达到 $\alpha=\pi/2$ 处，对应 $\Delta=\Delta(\pi/2)=\Delta_m$。设各 α 处的加工间隙为 $\Delta=\Delta(\alpha)$，其他有关参数对应为电解液压力 p、温度 T、气泡率 β、电导率 κ（参见图 4.5-34）。经过一段时间，在对应角度 $[\alpha_0, \pi/2]$ 的区间内，形成一个稳定的间隙分布模型，即图 4.5-34 中所示的 $\Delta=\Delta(\alpha)$，而最关心的是最后影响型面精度的间隙 Δ_m，即 $\Delta=\Delta(\pi/2)$。在加工电参数一定的条件下，其分布与阴极送进速度 v、阴极半径 R 密切相关。在一定假设条件下，可以推导出加工间隙 $\Delta(\alpha)$、特别是最终加工间隙 Δ_m 的分布规律；以有限微量 $\delta\alpha$、$\delta\Delta(\alpha_i)$ 代替微分变量 $d\alpha$、$d\Delta(\alpha)$，可以得到如下加工间隙模型方程组。

$$\Delta_b(\alpha)=\eta\omega\kappa_0(U-\delta_E)/v \tag{4.5-1}$$

$$\delta\Delta(\alpha_i)=R\{[\Delta_b(\alpha_i)/\Delta(\alpha_i)]-\cos\alpha_i\}\sin\alpha_i\delta\alpha \tag{4.5-2}$$

$$\Delta(\alpha_{i+1})=\Delta(\alpha_i)+\delta\Delta(\alpha_i) \tag{4.5-3}$$

$$\alpha_{i+1}=\alpha_i+\delta\alpha \tag{4.5-4}$$

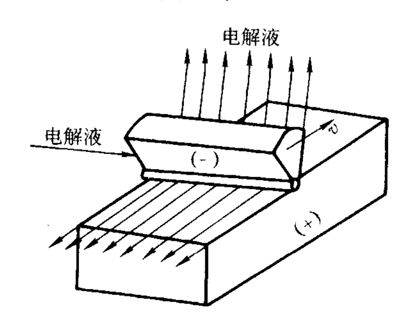
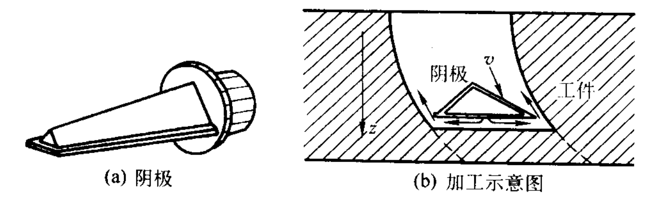


图 4.5-32 单直线刃阴极及其加工示意图



(a) 阴极 (b) 加工示意图

图 4.5-33 双直线刃阴极及其加工示意图

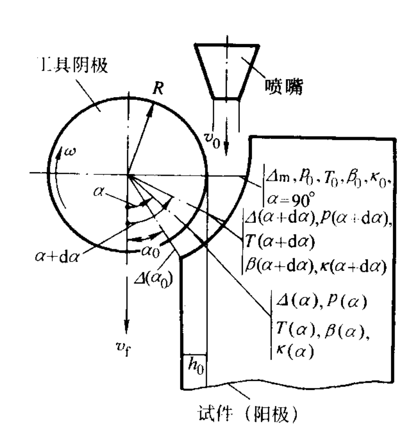


图 4.5-34 圆棒阴极展成电解几何模型

在计算机上对模型方程组进行数值解，可以得到加工间隙 Δ_m 与加工送进速度 V_f 的关系，试验及计算结果见图 4.5-35。两者比较，其间相差小于 5%，研究结果对分析加工精度、选择加工参数很有参考价值。

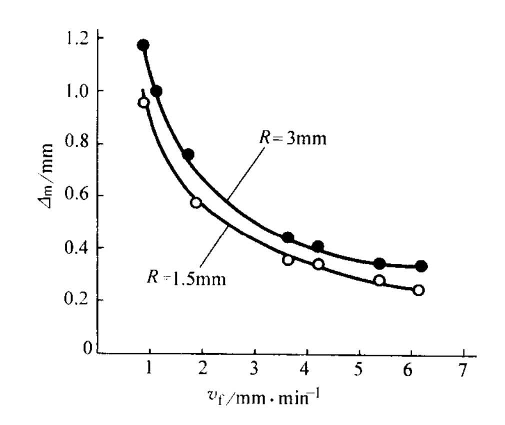


图 4.5-35 不同 R 的 Δ_m-v 特性曲线

—计算结果；• $R=3$ mm 试验结果；○ $R=1.5$ mm 试验结果；
其他参数：$h_0=0.2$ mm；电解液为 17% $NaNO_3$ 水溶液；
$T=20$℃；加工电压 $U=15$ V

从分析工艺规律考虑，影响间隙大小的因素很多，如加工电压，电解液浓度、温度、流速，工件材料等。经分析及试验验证，这些参数对间隙的影响趋势与普通电解加工一样，故试验研究旋转阴极展成电解加工的间隙特性时，将一些参数调整固定，作为确定的试验条件；而另一些参数，如进给速度 v、初始切深 h_0、初始间隙 Δ_0、阴极半径 R 则作为调整参数，研究其对间隙大小的影响，进行间隙特性试验（图 4.5-36）。竖直方向（z 向）在步进电机驱动下，阴极以 v 的进给速度上下运动；在水平方向（x 向），可手动调整初始切深 h_0 或初始间隙 Δ_0。以最终间隙 Δ_m（参见图 4.5-36）作为试验结果进行测定，因为 Δ_m 是影响成型精度的最后决定因素。

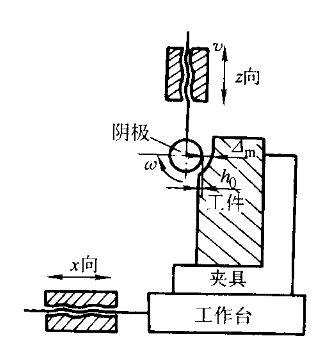


图 4.5-36 间隙特性试验图解

1）间隙 Δ_m 与进给速度 v 的关系 计算及试验的条件是：将进给速度从 0.9 mm/min 逐级调至 6.3 mm/min，研究其对最终间隙 Δ_m 的影响规律。试验时，在初始位置调整阴极与试件之间保持一定的初始切深 h_0，在本组试验中取 $h_0=0.2$ mm。其他参数在试验中保持恒定，分别为：旋转阴极半径 $R=3$ mm，电解液为 17% 的 $NaNO_3$ 水溶液，温度 $T=20$℃，加工电压 $U=15$ V。试验结果如图 4.5-35 所示。由结果可以看出，随着 v 的增加，Δ_m 逐渐减小。v 从0.9 mm/min

开始，随 v 增加，Δ_m 减小很快，但随着 v 继续增大，Δ_m 逐渐趋向于某确定值，即 $|d\Delta_m/dv|\to 0$。

2）间隙 Δ_m 与阴极半径 R 的关系　上述试验以两种不同半径的阴极（$R_1=3$ mm，$R_2=1.5$ mm）进行，结果都表示在图 4.5-35 上，以研究不同 R 对 Δ_m-v 曲线的影响。由图可以看出，当采用半径较小的阴极进行加工时，Δ_m-v 曲线下移。这说明，加工间隙 Δ_m 随阴极半径 R 的减小而减小。

3）间隙 Δ_m 与初始切深 h_0 的关系　保持 $v=1.8$ mm/min，取初始位置为阴极切入试件状态，初始切深 h_0 从 0 逐渐增至 0.6 mm，以试验 Δ_m 与 h_0 的关系。其他试验条件为：$R=3$ mm，$T=20$℃，电解液为 17% 的 $NaNO_3$ 水溶液。试验结果如图 4.5-37 所示。由图可知，当采用不同切深加工时，间隙 Δ_m 仍保持一常值（如图 $\Delta_m\approx 0.75$ mm）。这说明，初始切深对加工间隙的影响很小，可以忽略不计。这是一个很重要的间隙特性，它说明工件毛坯余量分布不均匀（将造成阴极加工工件时切深不同）不影响最终加工间隙 Δ_m，不会造成像拷贝式成型电解加工所特有的由于毛坯余量不均所引起的加工遗传误差，即展成电解加工具有很强的整形能力。

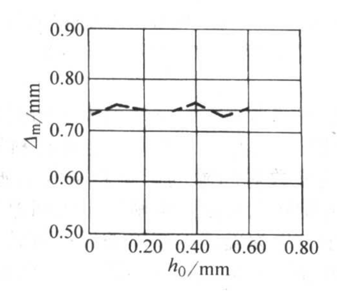


图 4.5-37　旋转阴极展成电解加工的 $h_0-\Delta_m$ 特性曲线

2.2.2　工艺特性

由间隙特性所决定，旋转圆棒阴极展成电解加工具有以下重要工艺特性。

1）间隙稳定性好，加工重复精度高　在同一种加工条件下，能否得到稳定的加工间隙值，是关系到加工重复精度的关键问题。为研究加工间隙的稳定性，选择主要工艺条件相同，即送进速度 v、电解液组成及温度、阴极结构及加工电参数均相同，重复五次进行试验；但为了试验不同初始间隙（或切深）对加工间隙的影响，又特别分成两组各五次试验，一组取初始切深 $h_0=0.2$ mm，另一组取初始间隙 $\Delta_0=0.1$ mm。试验结果表明，展成电解加工间隙有很好的重复性，间隙变化不超过 0.02 mm。

试验结果如表 4.5-9 所列。从表中可以看出，间隙值的变化范围小于 0.02 mm。这说明，用上述两种加工条件，即除初始加工状态不同外，在其余加工条件均相同的条件下，旋转阴极展成电解加工有很好的间隙稳定性，即将有很高的重复精度。还应指出：上述结果也表明，初始加工位置的不同，即 h_0 或 Δ_0 的差异，都不影响最终加工间隙 Δ_m，这一试验结果与 Δ_m-h_0 试验曲线的结论一致。

2）整平能力强　图 4.5-37 所示 Δ_m-h_0 特性曲线及表 4.5-29 所列试验结果均表明，初始切深及初始间隙的大小对最终间隙 Δ_m 的影响均可忽略，由此可推论，旋转圆棒阴极展成电解加工具有很强的整平能力。图 4.5-38 所示的整平效果试验进一步论证了这一推论。

表 4.5-9　间隙稳定性试验结果

初始状态 \ Δ_m/mm \ 试件号	1	2	3	4	5
$h_0=0.2$ mm	0.73	0.72	0.72	0.72	0.73
$\Delta_0=0.1$ mm	0.72	0.73	0.74	0.73	0.73

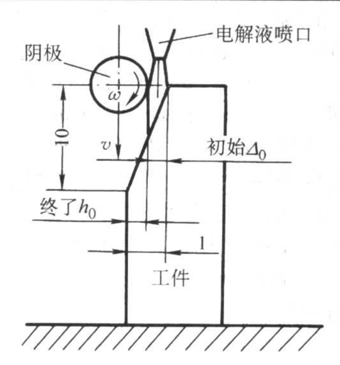


图 4.5-38　整平效果试验示意图

试验前，试件表面预先加工成 1∶10 的斜面，送进初始位置即试件最上方，在水平方向有初始间隙 $\Delta_0=0.40$ mm（参见图 4.5-38）；而在送进终点位置即工件斜面下方，阴极切入工件，在水平方向有切深 $h_0=0.60$ mm（参见图 4.5-38）。可见，加工过程中，随阴极由上往下送进运动，每个时刻阴极相对试件具有不同的初始间隙 Δ_0 和初始切深 h_0，阴极以速度 $v=1.8$ mm/min 竖直向下进给。加工完成后，测量所加工面与基准面（与进给方向平行的平面）的平行度，在加工全长 20 mm 的平面内，最高点与最低点的差值仅为 5 μm。结果表明，这一工艺具有很好的整平效果（图 4.5-39），比普通电解加工的整平能力强得多。

2.2.3　加工实例

基于上述间隙特性和工艺特性的试验结果，选择适当的阴极送进速度（如 $v=5$ mm/min）、适当的初始切深（如 $h_0=0.4$ mm）或初始间隙，控制旋转阴极进行适当的展成运动（图 4.5-31c），可以加工圆弧面和三维扭曲型面（图 4.5-39a、b）。展成加工前，试件毛坯预加工成 45°斜面，然后以旋转阴极逐层“切入”进行展成电解加工，试验所加工的圆弧面及三维扭曲型面误差小于 0.03 mm，表面粗糙度 $R_a<0.8$ μm。

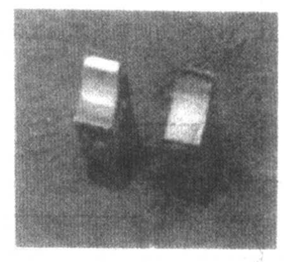


图 4.5-39　旋转阴极展成电解加工实例
（左为圆弧面，右为扭曲型面）

2.3　“单直线刃”喷射式阴极展成电解加工

如前所述，“单直线刃”阴极可以类比于直径很小的旋转圆棒阴极，有着类似于旋转圆棒阴极展成电解加工的间隙特性和工艺特性，以下做一简介。



2.3.1 间隙特性

1）阴极进给速度与加工间隙的关系　由“单直线刃”喷射式阴极展成电解加工模型（图4.5-40）可知，其加工精度取决于最终加工间隙 Δ_m 的变化，而对加工间隙最有影响的参数仍然是阴极相对工件的进给速度 v 的时、空分布，各种不同条件下的 Δ_m-v 曲线如图4.5-41～图4.5-44所示。图4.5-40及随后有关喷射式阴极展成电解加工间隙特性试验的基本条件是：阴极长50 mm，加工刃 $R=1.75$ mm，试件为软钢，电解液输送压力 $p=0.78$ MPa，电解液温度 $T=30$℃。试验结果显示，正如前所分析的那样，参数之间的影响关系及变化趋势与旋转圆棒阴极的类似。

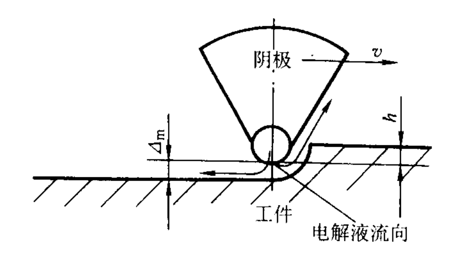


图4.5-40　“单直线刃”喷射式阴极展成电解加工模型

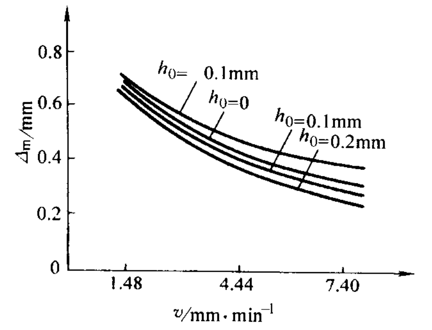


图4.5-41　不同 h_0 条件下的 Δ_m-v 关系（20% $NaNO_3$ 水溶液，$U=15$ V）

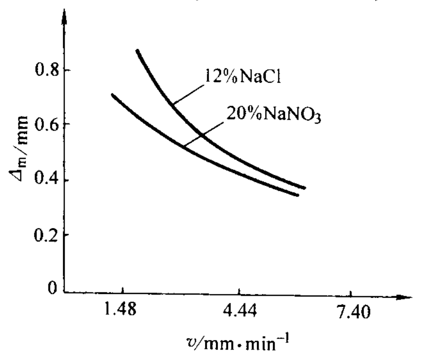


图4.5-42　不同电解液条件下的 Δ_m-v 关系（$U=15$ V）

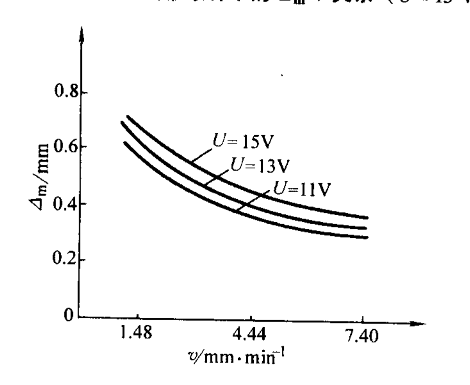


图4.5-43　不同加工电压 U 条件下的 Δ_m-v 关系（20% $NaNO_3$）

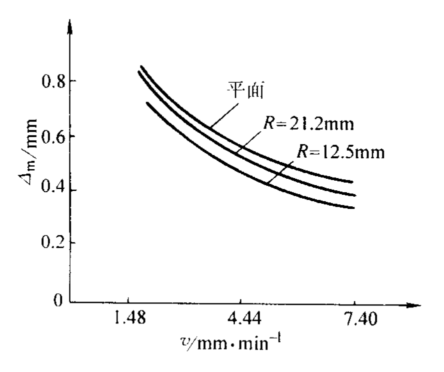


图4.5-44　不同曲率半径 R 条件下的 Δ_m-v 关系（12% NaCl，$U=15$ V）

为讨论问题方便，引入参量 $L_v=|\mathrm{d}\Delta_m/\mathrm{d}v|$，即 Δ_m-v 曲线斜率的绝对值，是进给速度 v 的改变而引起加工间隙 Δ_m 变化的比率。L_v 值越大，说明由于 v 的变化而引起 Δ_m 的变化越大；或者说，Δ_m 对 v 的变化，反应更加敏感。图4.5-41～图4.5-44所示 Δ_m-v 关系均表明，随着 v 增加而 Δ_m 减小，L_v 值也减小，当 v 大到一定值时，随 v 的改变而 Δ_m 的变化很小。这说明，选用更高的进给速度 v，加工间隙 Δ_m 更小，即可获得更高的复制精度，被加工型面与加工刃展成运动所形成的包络面更加吻合；同时 v 大，则 L_v 小，即 v 的变化引起 Δ_m 的变化小，这意味着具有更好的重复精度。所以，选择更高的进给速度有利于提高成形精度，包括复制精度和重复精度。

2）阴极切入工件的深度 h_0 与加工间隙 Δ_m 的关系　如图4.5-41所示，随着切入深度 h_0 的增加，最终加工间隙 Δ_m 略有减小；但随 v 的增大，同样切入深度的变化引起 Δ_m 的变化更多。结果还表明，h_0 的变化对 $L_v=|\mathrm{d}\Delta_m/\mathrm{d}v|$ 的影响很小，即在相同 v 时，尽管切入深度 h_0 不同，但对应同样的 v，L_v 值的差异很小。由此可以推论，在相同 v 条件下，应该选择尽可能大的切入深度。这样既可提高生产率（即提高了乘积 vh_0），同时由于 h_0 的增加使 Δ_m 减小，又提高了复制精度。但是，太大的切入深度 h_0 可能引起短路而烧伤阴极与工件。故实际加工时，应选取适当大的切入深度 h_0。

3）电解液对加工间隙的影响　如图4.5-42所示，在其他相同加工条件下，即或对比试验中 $NaNO_3$ 电解液的浓度为20%，其对应加工间隙仍然小于浓度为12%的NaCl电解液的加工间隙。由此可知，采用 $NaNO_3$ 电解液进行展成电解加工可得到比用NaCl电解液更高的加工精度，这也为加工试件的工艺试验所证明。

4）加工电压与加工间隙的关系　如图4.5-43所示，随加工电压增加，Δ_m 也增加，即图中的 Δ_m-v 曲线随加工电压 U 的变化而近似作上下平移。故可以推论，喷射式阴极展成电解加工过程，加工电压 U 对加工间隙的影响规律将与一般电解加工的规律相同。

5）被加工型面曲率半径对加工间隙的影响　如图4.5-44所示，在相同加工条件下，被加工面曲率半径 R 变小，加工间隙 Δ_m 也变小；当曲率半径 R 趋于无穷大，即加工面为平面时，加工间隙最大。由图示结果还可知，随加工面曲率半径的变化，$|\mathrm{d}\Delta_m/\mathrm{d}v|$ 的变化很小，可以忽略不计。由于加工面曲率半径的变化而引起加工间隙 Δ_m 的变化，这在研究喷射式阴极展成电解加工的成形规律时要引起注意，因为同一加工型面上各处的曲率半径可能是不同的。

6）加工间隙模拟方程　对展成电解加工，由于加工间隙的动态变化特点，它受时间、空间变化的影响，不存在如普通电解加工过程所形成的所谓平衡间隙。但根据试验结果

分析，可以假设展成电解加工存在某种准稳态间隙，如此可以使研究问题得到简化。这一准稳态间隙受加工参数和展成运动的影响，其数学模型是一个非定常微分方程组，要定量求解非常复杂。为了满足应用的目的，对上述有关试验结果的关系曲线，采用数理统计方法，在计算机上进行数学处理，可得到实用的加工间隙经验方程。根据实际加工条件不同，其表达式可以写成多种形式。例如：

$$\Delta_m = 0.77 + 0.34 \times 0.3h_0 - 0.048v^2$$

$$\Delta_m = 1.549(0.033U/v)^{0.5} + 0.11\exp[50(h_0 - 0.82)v]$$

式中符号的意义及单位均与图 4.5-41 ~ 图 4.5-44 所表达的相同。

应该再一次强调，上列表达式是对试验结果进行数理统计处理而得到的经验方程，只适用于一定的加工条件。经多次试加工验证，计算结果与加工结果误差很小，在适用条件下，方程具有一定的精度和工程实用性。

2.3.2 加工实例

由以上间隙特性研究可知，影响间隙分布的主要因素是阴极相对工件的进给速度 v，这是一个最活跃的影响因素。在加工过程中受其他各有关因素的影响，v 还会发生变化。一般地说，v 也是时间、空间的函数。

影响加工间隙的第二位因素则是加工型面的曲率半径和阴极切入工件的深度（或初始加工间隙），其影响程度不如进给速度那样显著，有时还很小以致可以忽略。但因为受被加工工件毛坯状态和最终加工尺寸、几何形状的制约，引起加工过程中各处加工余量（切入深度）和曲率半径的不同，其对加工间隙的影响在某些条件下也应该加以考虑。

至于加工电压、电解液成分、温度对加工间隙都具有显著影响，但它们都是在加工前预先选定，调整稳定，故在研究成形规律时，通常将它们视为在加工过程中稳定不变的条件。

基于上述分析，设计了突出进给速度 v、加工面曲率半径 R 对成形规律影响的典型试件加工工艺试验，以研究间隙特性与工艺特性的关系。

1）圆锥面加工　图 4.5-45 是以喷射式阴极展成电解加工圆锥面的示意图。阴极固定，试件以 ω 角速度旋转，则沿阴极加工刃各点的相对进给速度

$$v = \omega R$$

式中，R 为对应加工刃各点与旋转中心的距离。可见，沿加工刃各点的 v 随 R 增加呈线性增加，则据以上研究的 Δ_m-v 关系，可推论加工间隙将随 R 增大而逐渐减小。

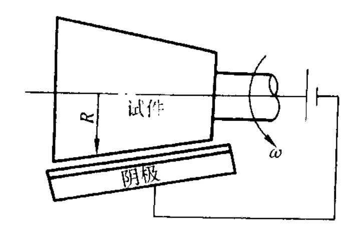


图 4.5-45　圆锥面加工示意图

这一工艺试验既研究了不同进给速度 v，也研究了不同曲率半径 R 对加工间隙的影响。加工结束后测量加工间隙沿阴极加工刃边的分布，其规律同图 4.5-44 所示的一致，反映了 v 及 R 的综合影响。

加工锥面的表面粗糙度 $R_a = 0.63 \sim 1.25\ \mu m$。

2）二维凸轮面加工　图 4.5-46 是以喷射式阴极展成电解加工二维凸轮面的示意图。凸轮绕中心轴线以 ω 角速度旋转，阴极在通过凸轮中心线的垂直方向以速度 v_z 向下运动，则阴极加工刃相对工件旋转轴的运动轨迹方程为

$$\rho = \rho_0 - v_z\alpha/\omega$$

式中，ρ_0 为加工起始时刻阴极加工刃与工件旋转中心的距离；α 为加工过程工件旋转过的中心角；ρ 为对应 α 角度阴极加工刃与工件旋转中心的距离。

上式表明，其相对运动轨迹是螺旋面。

对应图 4.5-46 所示几何关系可得：

$$\rho_0 = R_0 + \Delta_0;\ \rho = R + \Delta$$

式中，R_0、Δ_0 分别为加工初始位置、即 $\alpha = 0$ 时凸轮面的曲率半径及加工间隙；R、Δ 分别为对应转过 α 角度时凸轮面的曲率半径及加工间隙。

故上列运动轨迹方程可以写成

$$R + \Delta = R_0 + \Delta_0 - v_z\alpha/\omega$$

而阴极相对工件运动速度 v 为两种速度的合成，即：

$$v = v_z + \omega\rho$$

或　$$v = (v_z^2 + \omega^2\rho^2)^{1/2},\ \tan\theta = \omega\rho/v_z$$

式中 θ 为合成速度 v 与垂直运动速度 v_z 之间的夹角。

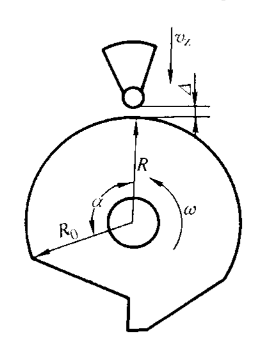


图 4.5-46　加工二维凸轮面示意图

工艺试验中，将阴极垂直向下送进速度 v_z 固定，取不同旋转角速度 ω 加工凸轮面。加工后测量不同 α 角度处的 R 及 Δ。试验结果表明，影响加工间隙 Δ 的主要因素是旋转角速度 ω，随 ω 增大，Δ 减小。曲率半径 R 对 Δ 也有影响，它主要是通过旋转线速度 ωR 影响 Δ，随 R 减小，Δ 增大。

工艺试验中，加工了满足设计要求的凸轮面，表面粗糙度 $R_a = 0.63 \sim 1.25\ \mu m$。

2.4 整体叶轮的数控展成电解加工

整体叶轮将叶片和轮盘构成一个整体，而不是通常叶片与轮盘的机械连接，使零件数、构件体积和重量均有减少；同时还可以消除传统叶片、轮盘连接之间的气流逸流损失，避免叶片、轮盘机械连接之间的微动磨损、微观裂纹以及机械连接件的意外损坏等故障。从而使发动机工作效率、推重比、工作寿命和安全可靠性都大大提高。在新型火箭发动机中，采用带冠整体涡轮还可以大大减小传统涡轮部件结构中叶尖与涡轮外环之间的逸流损失，涡轮效率比较传统结构有大幅提高。由于上述突出优点，整体叶轮、带冠整体涡轮在先进、高推重比航空发动机及新型大推力火箭发动机中得到越来越多的应用。而由于整体叶轮的复杂几何结构及材料难切削，使得其加工又成为世界级的技术难题。各国专家们近二、三十年来，一直在努力寻求优质、高效、低成本的加工方法以求解决，其中数控电解加工技术显示了诱人的前景。它特别地能解决以数控铣、精密铸造难加工或不能加工的难题：如加工小直径、多叶片（几十片、百余片）、小叶间通道（1.5 ~ 3 mm 宽度）、难切削材料制成的变截面扭曲叶片整体叶轮；还能加工以数控铣无法加工的带冠整体涡轮，这两类加工特别显示了该项新加工技术的工艺特点。研究及应用均表明，采用数控电解加工整体叶轮，比较五坐标数控铣：①工时可减少 50% 以上；②可以加工任何高强、高硬

难切削金属材料；③不会产生残余应力和变形，这对薄型叶片的整体叶轮加工显得尤为重要。该项技术不仅增强了可加工能力，同时还由于其技术的先进性，即具有数控技术的优点，加工过程由计算机控制，消除了人为因素的干扰，能更好地保证加工精度和加工质量，提高加工的稳定性；还可极大地减少生产准备时间，降低劳动强度，提高产品制造的快速响应能力，加快新品研制速度。

数控电解加工整体叶轮的工序安排是：叶轮锻造毛坯经车加工成轮盘，然后采用双直线刃阴极展成电解加工叶间通道（图 4.5-30），再用单直线刃阴极或电解磨轮分别展成电解加工叶片、叶背型面（图 4.5-47、图 4.5-48）。以下将就其主要关键技术进行介绍。

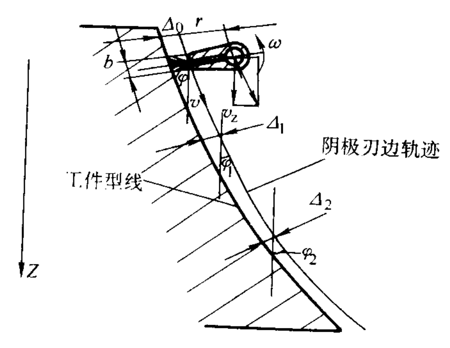


图 4.5-47　单直线刃阴极展成电解光整加工叶片型面

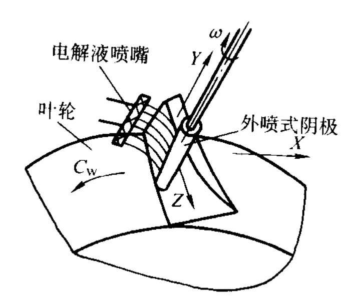


图 4.5-48　展成电解磨精加工叶背型面

2.4.1　展成运动构成

通常，整体叶轮叶片型面以列表曲面（型值点）的形式来描述。数控展成电解加工的编程任务，就是要根据这些型值点数据，在保证一定精度条件下，拟合成以直母线展成的直纹曲面（图 4.5-49）。同时，据此设计阴极，且在考虑电解加工间隙分布的基础上，计算阴极展成运动轨迹并编制相应数控程序。对于非可展直纹曲面的加工，则还要采取其他必要的工艺措施。

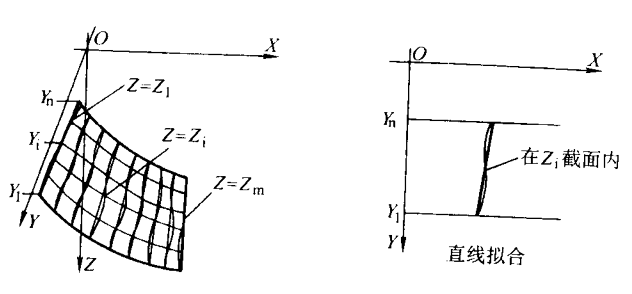


图 4.5-49　直纹曲面拟合

按照整体叶轮型面的特点，对于可以用平行直纹面来拟合的型面加工，展成运动只需四轴联动；而对于要用非平行直纹面来拟合的型面加工，其展成运动需要五轴联动。对于如图 4.5-49 所拟合成的直纹曲面，为了提高曲面拟合精度，还可以进行插值加密处理。在上述直纹曲面拟合的基础上，再考虑加工间隙的分布，可以得到阴极刃边的展成运动轨迹，即构成了可实现整体叶轮叶间通道加工的阴极相对叶轮间的数控展成运动。

2.4.2　自动编程

基于上述展成运动轨迹的分析计算方法，可以实现数控展成运动的自动编程，其编程软件结构及数据处理流程如图 4.5-50 所示。

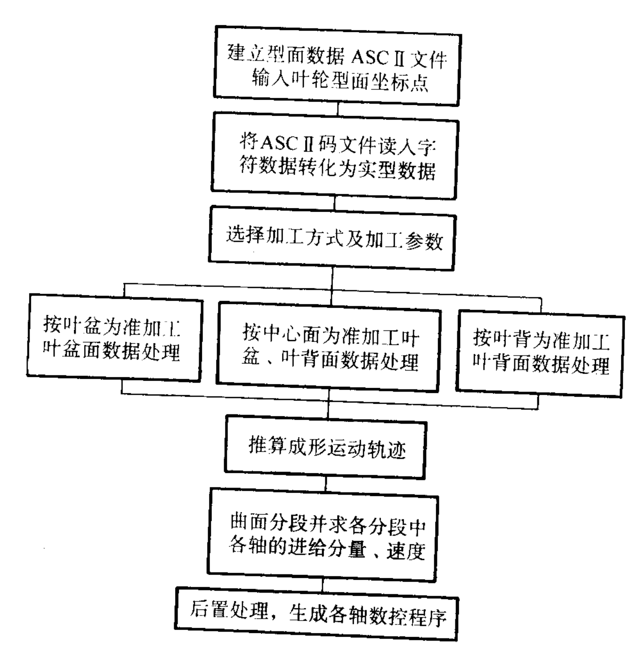


图 4.5-50　自动编程软件的总体方框图

2.4.3　阴极设计

型面拷贝式电解加工，工具阴极型面是工件型面的反拷贝形状，而且还要特别考虑阴极和工件间的加工间隙分布。对复杂型面加工，阴极设计制造是一项要求高、难度大、耗费多的技术工作。而展成电解加工是基于简单阴极加工刃边的展成运动轨迹包络面及加工间隙的分布形成工件型面的，阴极设计大为简化。但由于展成加工的特点所形成流场、电场动态分布的特点，故其阴极设计的特殊性也应当重视。

展成电解加工阴极设计要求流场均匀、结构合理，要保证在整个加工过程不产生干涉、过切现象，必要的时候阴极某些部位也要采取绝缘措施，以减小或消除杂散腐蚀。

如前所述，展成电解加工的阴极有用于叶间通道加工的双直线刃阴极（参见图 4.5-30）和用于叶片型面精加工的单直线刃阴极（参见图 4.5-47）两种结构。加工叶间通道的双直线刃阴极一般设计成焊接式扁平斜角结构（图 4.5-51），出液槽的形状有直线和“S”形窄缝式。阴极非加工面与底板交角 α_1、α_2 的大小应保证加工时不产生干涉；阴极左、右加工刃边应圆角过渡，钳修光整。其主要结构尺寸有顶宽 A、长度 L、底宽 B、底板斜角 θ 等（参见图 4.5-51），基于叶间槽尺寸及加工间隙，按相应几何关系进行设计（参见图 4.5-52）。

2.4.4　数控电解机床及多轴联动数控系统

为了实现阴极—工件的多坐标运动，则需要多轴数控电解机床（图 4.5-53）及相应的多轴联动控制系统（图 4.5-54 并参见图 4.5-29）。机床具有垂直进给 Z 轴、工作台水平运动 X、Y 轴、旋转工作台 C_W 旋转轴、阴极的 C_T 摆动轴共 5 轴。各直线轴均由步进电机、滚珠丝杆传动，在滚动导轨上实现部件直线运动。旋转轴则通过精密谐波减速器带动相应部件作旋转运动。其各轴运动脉冲当量为：



Z 轴—0.5 μm/Pulse；X 轴、Y 轴 —1 μm/Pulse；C_T 轴、C_W 轴 —0.001°/Pulse。

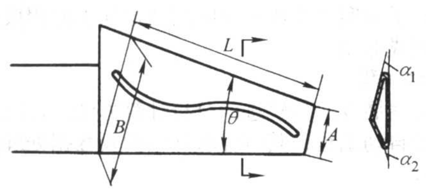


图 4.5-51 平板双直线刃阴极

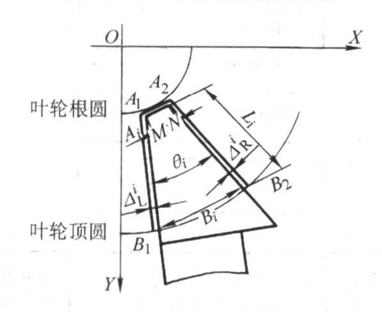


图 4.5-52 阴极尺寸设计图解

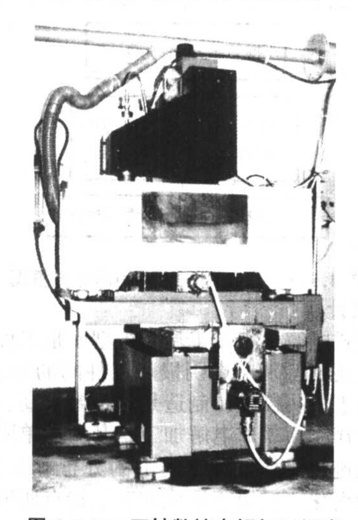


图 4.5-53 五轴数控电解加工机床



图 4.5-54 经济型五轴联动数控系统

数控电解机床的其他基本要求与通用电解机床的相同，即刚性好，进给速度宽、特性硬，运动精度、定位精度高；设备耐腐蚀、电气抗干扰能力强；运行安全、可靠等。

机床数控系统包括主计算机和控制各轴运动的经济型数控单元，还设置了专门的通讯、控制接口，以保证主计算机与各控制单元的通讯以及各轴之间的同步联动运动。

2.4.5 加工工艺

1）工艺规律 在前面 2.2.1 中介绍了旋转圆棒阴极展成电解加工的间隙特性，并且指出直线刃阴极可以类比于直径很小的圆棒阴极。对于整体叶轮叶间槽的加工，可以看成 2 条小圆角半径的直线加工刃，对叶间通道进行展成电解加工。类似于旋转圆棒阴极展成电解加的间隙特性的研究，可以将叶片空间三维型面分割为很多片微小平面，利用电解加工的微分方程，研究第 i 段小平面内的加工间隙；然后，以第 i 段小平面的加工结束的状态作为第 $i+1$ 小平面的起始条件，进而研究第 $i+1$ 小平面的加工过渡过程；依次逐段递推，可以列出各小平面段加工的过渡过程方程组及最终侧面加工间隙计算式。对有关方程组进行数值计算，其结果及加工实测结果见图 4.5-55，而实际加工型面的某截面型线与计算结果比较见图 4.5-56。相应计算及试验的参数为：叶轮材料—2Cr13、加工电压 $U = 16$ V、分解电压 $\delta_E = 1.6$ V、电解液—11%NaCl 水溶液、温度 $T = 30$℃、加工区进口压力 $p_0 = 0.55$ MPa、垂直进给速度 $v = 0.75$ mm/min、端面初始间隙 $\Delta_0 = 0.5$ mm 。以上理论分析及工艺试验结果对实际加工工艺参数的选择有指导作用。

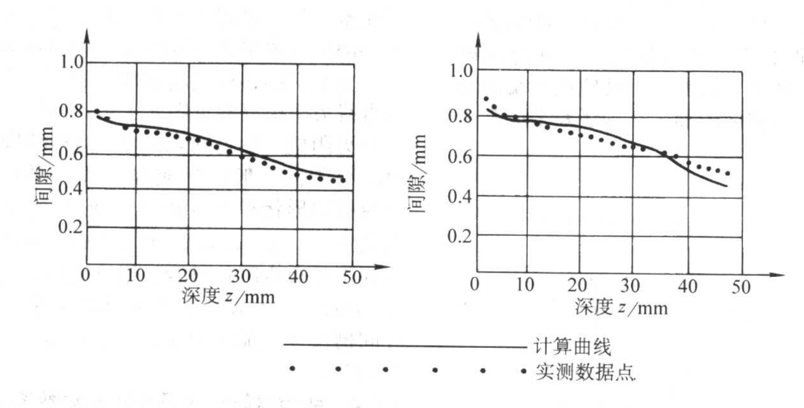


图 4.5-55 加工间隙的计算值及加工实测值

2）加工实例 在掌握前述各项关键技术的基础上，进行必要的工艺试验并掌握整体叶轮加工的工艺规律，包括优选工艺参数，改进阴极结构及流场设计，修改、定型加工程序等。通过大量基础工艺试验及典型叶轮的加工工艺试验，掌握整体叶轮的加工工艺规律，加工了如图 4.5-57 所示的典型样件并已经在某型航空发动机上装机使用。目前，数控展成电解加工整体叶轮叶片型面精度一般可以达到 ±0.12 mm，而对小型叶轮（直径在 120 mm 以下）可以达到 ±0.08 mm。



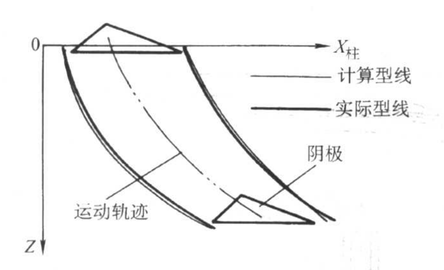


图 4.5-56　实际型线与计算型线的比较

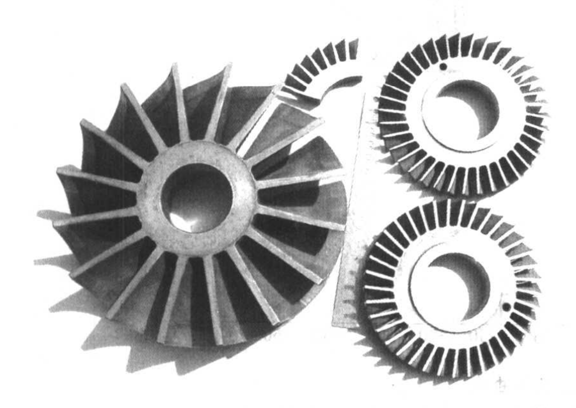


图 4.5-57　数控电解加工的整体叶轮样件

3　小间隙电解加工

3.1　小间隙电解加工的工艺特点

提高电解加工精度，是促进电解加工的发展、扩大电解加工的应用所迫切需要解决的问题。在 0.05 ~ 0.1 mm 的端面加工间隙条件下进行电解加工（以下简称为小间隙加工），可以在使用一般电解液且不需混气的条件下加工出高精度、低表面粗糙度的工件。在小间隙加工的条件下，使用对所加工的材料具有非线性加工特性的电解液来加工型腔（这种加工工艺以下简称为小间隙非线性型腔加工），型面精度在 ±0.05 mm以内，表面粗糙度 R_a0.4 ~ 0.3 μm。在小间隙加工条件下，使用倒置绝缘腔结构的阴极进行套型加工（这种加工工艺以下简称为用倒置绝缘腔结构的阴极小间隙套型），加工精度可以达到 ±0.05 ~ ±0.03 mm，并且在工件全长范围内的尺寸偏差不大于 0.02 mm。更重要的是：用倒置绝缘腔结构的阴极小间隙套型加工精度与电解液对材料的加工特性是线性的（以下简称为线性加工）或非线性的（以下简称为非线性加工）几乎无关。下面从五个方面论述小间隙电解加工工艺。

3.1.1　小间隙加工提高精度的原理

加工间隙的大小及变化是决定加工精度的一个主要因素。这里首先分析一下间隙变化对加工精度的影响。

在第 1 章电解加工基本原理中已经述及，电解加工端面平衡间隙的表达式为

$$\Delta_b = \eta\omega\kappa \frac{U_R}{v_c}$$

电流效率和体积电化当量的乘积 $\eta\omega$ 在线性加工时为常量，非线性加工时则为变量。但当 Δ_b 已给定，只讨论其微量变化时近似将 $\eta\omega$ 作为常量处理。对上式进行全微分可得

$$\mathrm{d}\Delta_b = \Delta_b \left(\frac{\mathrm{d}U_R}{U_R} + \frac{\mathrm{d}\kappa}{\kappa} - \frac{\mathrm{d}v_c}{v_c}\right) \tag{4.5-5}$$

式中，$\mathrm{d}\Delta_b$ 为端面平衡间隙的微量变化；$\mathrm{d}U_R/U_R$ 为加工电压相对变化，可看作加工电源的相对稳压精度；$\mathrm{d}\kappa/\kappa$ 为电导率相对变化，由电解液的温度、浓度以及成分的变化引起；$\mathrm{d}v_c/v_c$ 为进给速度相对变化，可看作速度控制精度。式(4.5-5) 说明了设备控制条件与工艺条件的关系。括号内三项 $\frac{\mathrm{d}U_R}{U_R}$、$\frac{\mathrm{d}\kappa}{\kappa}$、$\frac{\mathrm{d}v_c}{v_c}$ 是由设备进行控制的条件，括号外的 Δ_b 是工艺条件。端面平衡间隙的微量变化除与设备的控制精度有关外，还与所取的 Δ_b 的大小成正比，即 Δ_b 越小，所引起的间隙变化 $\mathrm{d}\Delta_b$ 也越小，这就是小间隙加工能提高精度的基本原理，即在小间隙条件下可以实现高精度电解加工。

3.1.2　高电流密度区的电解液加工特性

早在 1974 年就发现了用 NaCl 电解液加工 GH40 材料时，在一定条件下，也会呈现出非线性加工特性。以后又用 NaCl、$NaNO_3$ 电解液，在不同浓度、不同温度、不同外加电压的情况下加工 GH40、1Crl8Ni9Ti 以及 45 钢等三种材料，测定了在高电流密度区（30 ~ 830 A/cm²）的电解加工特性曲线，结果见图 4.5-58、图 4.5-59 和图 4.5-60。其中 $\eta\omega$-i 曲线是实测的，$\eta\omega$-Δ 曲线是根据 $\eta\omega$-i 曲线换算得到的。从这三组曲线可以归纳出以下几点趋势。

1）使用 NaCl 电解液加工 45 钢呈线性加工（参见图 4.5-58）。测试用的电解液浓度分别为 2%，5%、10%、14% 和 24% 等五种，外加电压为 20 V，电流密度从 40 A/cm² 增加到 830 A/cm²，$\eta\omega$ 值基本上都在 2.15 mm³/A·min 左右。

2）使用 NaCl 电解液加工 GH40 与 1Cr18Ni9Ti 两种材料（参见图 4.5-59、图 4.5-60）以及 $NaNO_3$ 电解液加工上述三种材料（参见图 4.5-58、图 4.5-59 和图 4.5-60）都是非线性加工。其中 NaCl 电解液加工 1Cr18Ni9Ti 的 $\eta\omega$-i 曲线较为特殊，其他 $\eta\omega$-i 曲线都很有规律，差异并不大。因此很难直接从 $\eta\omega$-i 曲线判别其非线性质量的优劣，但转换成 $\eta\omega$-Δ 曲线后区别就明显了。曲线陡说明随着 Δ 的增大，$\eta\omega$ 下降快，非线性质量好，这也是实际加工中所希望的；反之，则非线性质量差。根据这个标准可以看出：①随着电解液浓度的提高，非线性质量降低；②电解液浓度相同，随着加工电压的提高，非线性质量降低；③一般来说，$NaNO_3$ 电解液比 NaCl 电解液的非线性质量好；④使用同一种电解液加工不同材料，其非线性质量也不一样。

3）一般认为 NaCl 电解液以及浓度为 26% 以上的 $NaNO_3$ 电解液是线性电解液，这个看法是不全面的。线性与非线性不是电解液固有的特征，而与所加工的材料有关。

4）从图 4.5-59、图 4.5-60 可以看出：使用 $NaNO_3$ 电解液加工 GH40、1Cr18Ni9Ti 两种铁基合金材料的实际电化当量只能达到高价溶解的理论值。这一点也可以从电解生成物为棕红色得到证明；使用 NaCl 电解液加工这两种材料的实际电化当量，在高电流密度区可达到低价溶解的理论值。这一点也可以从电解生成物随着电流密度的升高，由棕红色转化为墨绿色得到证明。还有资料认为，使用 NaCl 电解液加工与 GH40、1Cr18Ni9Ti 类似的材料，其 $\eta\omega$ 值达不到理论值。其原因可能还是在较大间隙、较小电流密度的条件下加工，还只能实现高价溶解，所以 $\eta\omega$ 值依然较低。而如果在小间隙、高电流密度条件下加工，则可以实现低价溶解，此时 $\eta\omega$ 值较高（参见图 4.5-59、图 4.5-60）。

需要指出的是：了解使用某种电解液加工某种材料的加工特性是线性的或非线性，对提高加工精度具有重要参考价值。一般来说，非线性加工比线性加工的精度要高。但这也不能绝对化，加工精度的高低还与加工工艺有很大关系。例如：NaCl 电解液普遍地被认为是线性电解液，只适合于低精度加工。但正如上述试验结果所介绍的那样，它在加工 45 钢时确实是线性加工。但线性加工能不能得到高精度呢？这在随后本节的第 3.1.4 段中还要专题进行介绍，结论是在

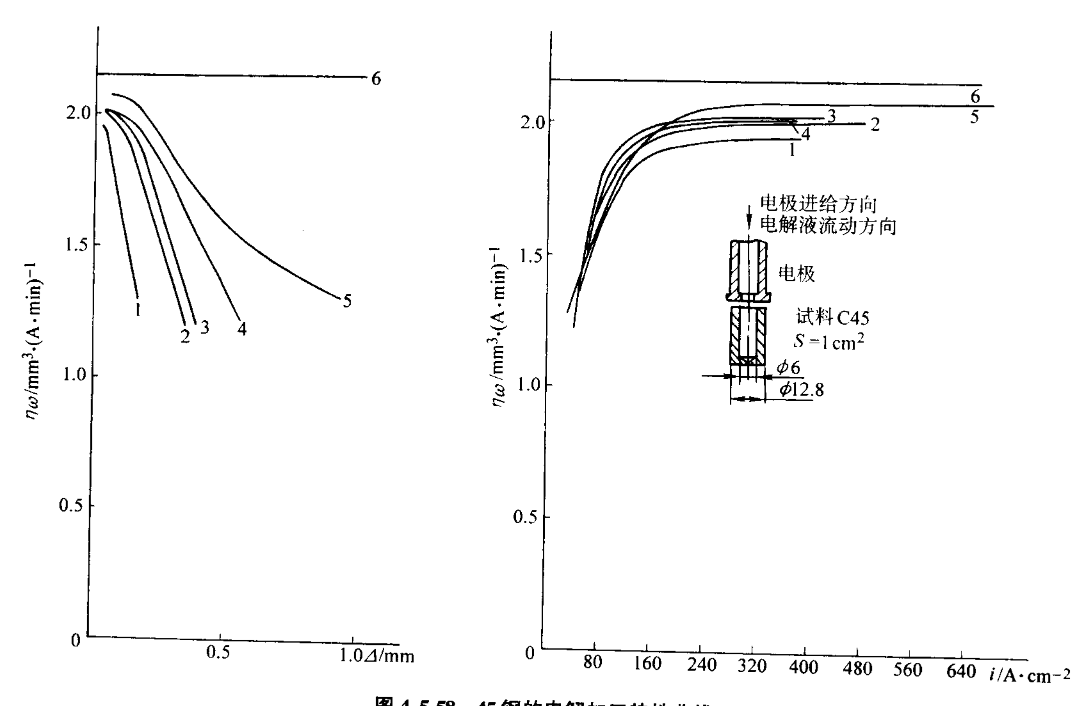


图 4.5-58 45 钢的电解加工特性曲线

1—$NaNO_3$ 50%，20℃，20 V；2—$NaNO_3$ 11%，28℃，20 V；3—$NaNO_3$ 20%，27℃，15 V；4—$NaNO_3$ 20%，25℃，20 V；5—$NaNO_3$ 27%，33℃，20 V；6—NaCl 各种浓度，20 V

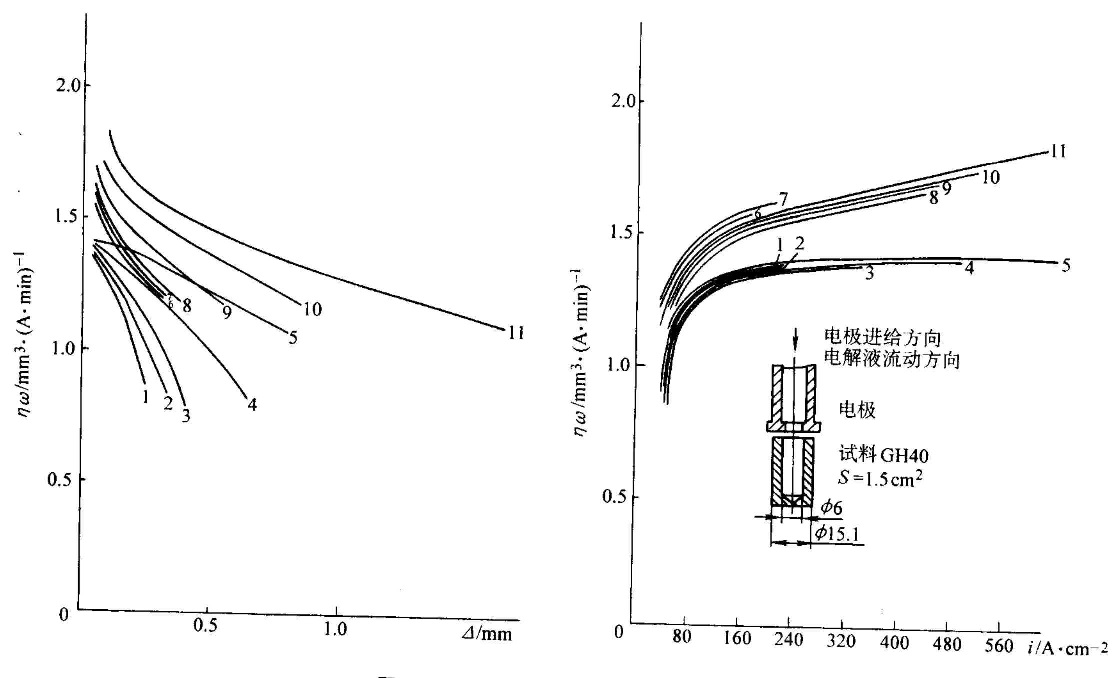


图 4.5-59 GH40 的电解加工特性曲线

1—$NaNO_3$ 5%，29℃，20 V；2—$NaNO_3$ 11%，29℃，15 V；3—$NaNO_3$ 11%，26℃，20 V；4—$NaNO_3$ 20%，25℃，20 V；5—$NaNO_3$ 27%，35℃，20 V；6—NaCl 5%，24℃，15 V；7—NaCl 5%，24℃，20 V；8—NaCl 10%，38℃，15 V；9—NaCl 10%，31℃，20 V；10—NaCl 16%，36℃，20 V；11—NaCl 24%，49℃，20 V

套型加工时采取一定的工艺措施后，完全可以实现高精度加工。

3.1.3 小间隙非线性型腔加工

用大间隙加工型腔时，对于整平、间隙过渡过程、误差遗传、毛坯加工余量问题以及电场分布等问题都不能忽略，但在小间隙加工时这些问题的影响并不像大间隙加工时那样大。所以，这里只讨论小间隙加工提高型腔加工的重复精度与复制精度的原理，以及小间隙非线性型腔加工时法向间隙的确定。

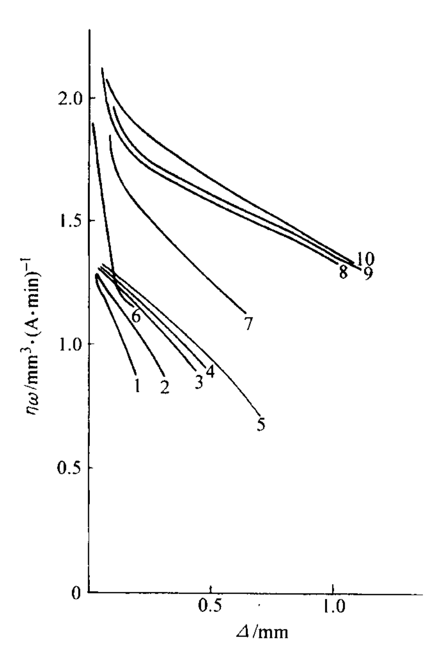
型腔在线性加工时的法向间隙为：

$$\Delta_\theta = \frac{\eta\omega U_R \kappa}{v_c \cos\theta} = \frac{\Delta_b}{\cos\theta} \tag{4.5-6}$$

式中，θ 为阴极送进速度与阳极表面法向之间的夹角。

微分式（4.5-6）得：

$$d\Delta_\theta = \frac{\Delta_b}{\cos\theta}\left(\frac{dU_R}{U_R} + \frac{d\kappa}{\kappa} - \frac{dv_c}{v_c}\right) \tag{4.5-7}$$



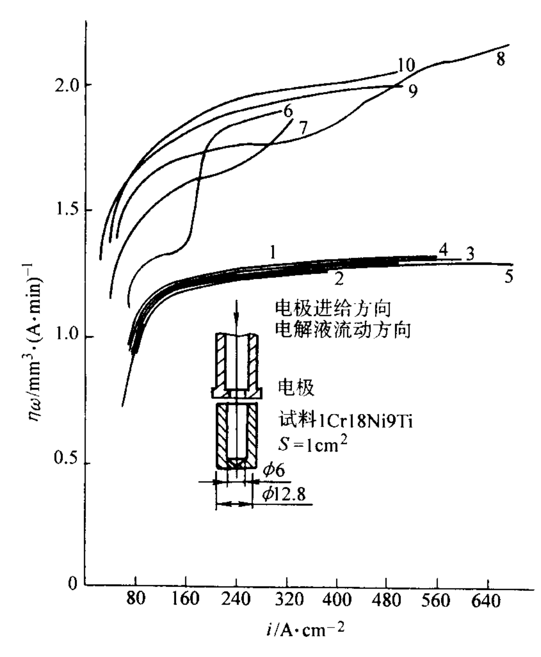


图 4.5-60　1Cr18Ni9Ti 的电解加工特性曲线

1—$NaNO_3$ 5%，29℃，20 V；2—$NaNO_3$ 11%，27℃，20 V；3—$NaNO_3$ 20%，26℃，20 V；4—$NaNO_3$ 27%，31℃，15 V；5—$NaNO_3$ 27%，29℃，20 V；6—NaCl 4%，28℃，20 V；7—NaCl 9%，32℃，20 V；8—NaCl 24%，37℃，20 V；9—NaCl 24%，37℃，15 V；10—NaCl 14%，36℃，20 V

式（4.5-7）表示了对应于不同倾角处的法向间隙的微量变化除了与三个参量的控制精度有关外，还与所取的 Δ_b 的大小成正比。鉴于型腔加工在整个加工过程中都处于去除余量的状态，加工尺寸是在阴极进给最终瞬间决定的，因此（4.5-7）式说明了小间隙加工能提高型腔加工的重复精度的原理。

提高型腔的加工精度，单纯地提高重复精度是不够的，更重要的是提高复制精度。设阴极最大倾角 θ_{max} 对应的最大法向间隙 $\Delta_{\theta max}$ 与倾角为零度处的法向间隙（即 $\Delta_\theta=\Delta_b$）的差值为 Δ'_θ，则有：

$$\Delta'_\theta=\Delta_{\theta max}-\Delta_b=\Delta_b\left(\frac{1-\cos\theta_{max}}{\cos\theta_{max}}\right)\qquad(4.5\text{-}8)$$

对于确定的阴极，式（4.5-8）括号内是个定值。Δ'_θ 表示了加工出的型腔与阴极之间各处的法向间隙不一致程度的最大值。这个值的大小说明了复制精度的好坏。Δ_b 给定得愈小，Δ'_θ 愈小，复制精度愈高；反之，复制精度差。这是小间隙加工提高复制精度的原理。

非线性加工时的 Δ'_θ 比用（4.5-8）式计算的值要小些，复制精度也就更高些。因此采用小间隙非线性型腔加工是提高型腔加工精度的合理工艺。

非线性加工时，对应于不同倾角处的法向间隙可以利用 $\eta\omega$-Δ 曲线来确定。其方法是：根据给定的 Δ_b 在 $\eta\omega$-Δ 曲线上定出 Δ_b 点，过 Δ_b 点作平行于 Δ 轴的平行线，用式（4.5-6）计算出线性加工时不同倾角处的 $\frac{\Delta_b}{\cos\theta}$ 值，在平行线上定出 $\frac{\Delta_b}{\cos\theta_1}$、$\frac{\Delta_b}{\cos\theta_2}$、$\frac{\Delta_b}{\cos\theta_3}$……等点，过诸点和原点作直线与 $\eta\omega$-Δ 曲线交于 $\Delta_{\theta1}$、$\Delta_{\theta2}$、$\Delta_{\theta3}$……，这些点的横坐标即为对应于 θ_1、θ_2、θ_3……的非线性加工时的法向间隙（参见图 4.5-61）。

使用小间隙非线性型腔加工不仅获得了很高的精度与很低的表面粗糙度，更重要的是阴极设计制造大为简化。可以采用等间隙阴极设计（参见图 4.5-62），保证 ±0.05 mm 精度，目前在一般型腔加工中还不太容易做到。显然，如按确定的法向间隙来设计制造阴极，则可获得更高的加工精度。

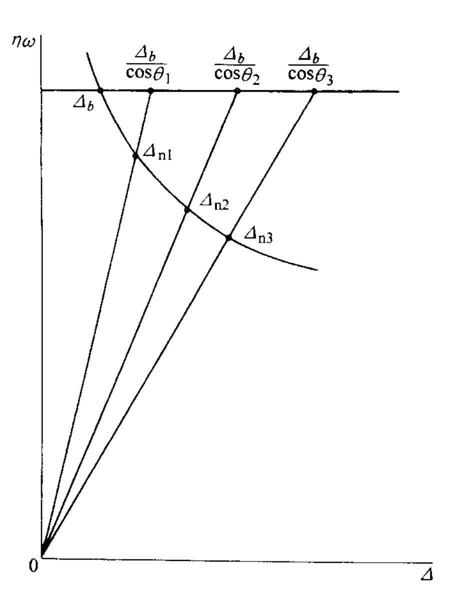


图 4.5-61　法向间隙确定方法

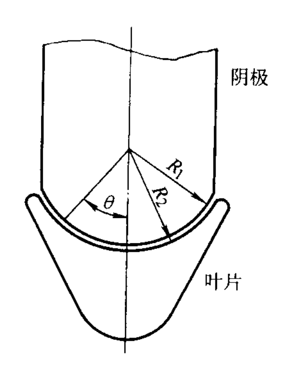


图 4.5-62　等间隙阴极设计示意图

事实证明：型腔加工中的很多问题随着加工间隙缩小而趋于理想化，所以才有可能用式（4.5-6）、式（4.5-7）、式（4.5-8）以及其他一些简单的关系，比较准确地描述了型腔加工中的实际情况。加工间隙增大后，各种因素的影响会增大，确定法向间隙的误差也会增大。例如当 Δ_b 增大到 0.3 mm 以上，即使按确定的法向间隙来设计制造阴极，也难以保证 ±0.05 mm 的加工精度。全面考虑型腔加工中的各种问题来设计制造大间隙高精度加工用的阴极，在理论上有可能，但目前在实际工程上还难以办到。

3.1.4 用倒置绝缘腔结构的阴极小间隙套型

套型加工的精度由重复加工误差、单件加工误差、锥度以及截面形状误差等四种误差所组成。产生这些误差的原因：①由设备控制精度产生的加工参数的误差引起侧壁间隙的变化，它不仅产生重复加工误差，还产生单件加工误差，使一个工件在全长范围内的截面尺寸不完全一致；②由杂散电流二次腐蚀的积累效应造成工件上小下大，产生锥度；③由阴极设计制造的误差引起套型加工的截面形状误差。因此，提高套型精度就必须设法减小这四种误差。

使用确定的阴极，侧壁间隙的变化是由端面平衡间隙的变化引起的。因此，由式（4.5-5）所阐述的小间隙提高加工精度的原理在这里同样适用。在套型时，使用小间隙加工不仅能减小重复加工误差，同则还能减小单件加工误差。又因侧壁间隙的大小不仅与 Δ_b 的大小有关，还与阴极刃边的厚度有关。所以，为了减小重复加工误差与单件加工误差，阴极刃边应尽量薄一些。可通过倒角或倒 R 来减薄刃边，使用薄刃边（0.3～0.5 mm）的阴极进行小间隙（0.05～0.1 mm）加工，在设备控制精度不太高的条件下，重复加工误差与单件加工误差都不致超过 0.02 mm，因此这两种误差对提高套型加工精度的影响并不大。

由杂散电流二次腐蚀积累效应而造成的锥度是难以提高套型精度的关键。为了减小或者消除锥度，曾经使用过三种工艺方法，在此简要介绍如下。

1）小间隙加工 由式（4.1-49）可知：当加工电压、电导率固定，缩小 Δ_b 必须提高进给速度，则杂散电流作用时间缩短，能减小锥度；当加工电压、进给速度固定或进给速度、电导率固定，要缩小 Δ_b 则必须降低电导率或加工电压，则杂散电流降低，也能减小锥度；但实践表明，小间隙加工减小锥度的效果不太显著。

2）非线性加工 当已成形面离开阴极刃边后，随着距离增大，一方面杂散电流由于电阻增大而减小，另一方面 $\eta\omega$ 值也随着距离增大而减小。因此，减小锥度的效果较为显著。把它与小间隙加工结合起来后成为小间隙非线性加工，当加工长度为 30 mm 左右时，其锥度值一般为 0.02～0.1 mm，与电解液对材料的非线性加工特性好坏有关，因此还不能作为一种稳定的高精度套型加工工艺。与上节所述对比一下可以看出：小间隙非线性加工在提高型腔加工时的复制精度方面效果很显著，但在套型加工时减小锥度方面还不够理想。

3）利用出水端成形 出水端成型的特点是：电解液中混进了加工时析出的气体，在阴极刃边处的电解液是气液混合相，当电解液离开阴极刃边后，气体膨胀，电阻增大，能对已加工面起保护作用。这个效果很显著，特别是用高送进速度小间隙加工时尤为突出，甚至可以使用不绝缘的阴极，用 NaCl 电解液实现锥度接近于零的加工。但出水端成型电解液呈发散状态，流场不好，表面粗糙度也比进水端成型方式要高些。虽然加背压可以改善流场，也可以降低表面粗糙度，但对减小锥度的效果也随之降低。所以这项工艺仍满足不了既高精度、又低表面粗糙度的加工要求。

上述三种工艺方法在克服套型加工的锥度方面均有不足之处。为了实现高精度、低表面粗糙度套型加工，倒置绝缘腔结构的阴极小间隙套型工艺是一项效果显著的实用技术。这项工艺综合应用了以下四项工艺措施：①小间隙加工，可以减小锥度、重复加工误差以及单件加工误差；②阴极结构上改变了电力线分布状态；③用了特殊保护措施；④利用进水端成型，电解液在阴极刃边处呈收敛状态，流场好，表面粗糙度低。这项加工工艺的阴极结构可以通用。多年的实践证明，这项工艺可使套型加工的锥度接近于零，性能非常稳定可靠，倒置绝缘腔结构的阴极示意见图 4.5-63。

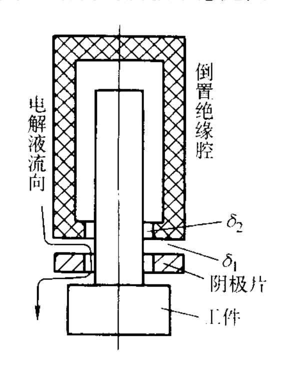


图 4.5-63 倒置绝缘腔结构阴极示意图

采用倒置绝缘腔结构的阴极加工具有五大工艺特点。

1）与线性加工或非线性加工几乎无关 采用倒置绝缘腔结构的阴极套型加工时，不论是线性加工或者是非线性加工，都能获得同样的加工精度。例如：使用图 4.5-58～图 4.5-60 列出的任一种电解液加工其中的任一种材料，尽管表面粗糙度不同，只要不产生剥落现象，则在工件全长范围内的尺寸偏差都能不超过 0.02 mm。这个偏差已不是套型加工的锥度，而是单件加工误差。从图 4.5-58～图 4.5-60 可以看出，这三种加工实例的加工特性区别是很大的，但用倒置绝缘腔结构的阴极小间隙套型时，得到的结果则相同，这种情况在一般正水套型加工中不可能出现。

2）与加工长度无关 在一个工件加工过程中，只要保持电解液温度变化不超过 ±0.5℃，电源的稳压精度与恒速控制精度在 2% 左右，那么加工长度从 20 mm 增加到 120 mm，其全长范围内的尺寸偏差都能保持在 0.02 mm 以内，并不因加工长度增加而使全长范围内尺寸偏差随着增大。上面所举的三种加工实例也能说明这一点。

3）表面粗糙度比一般正水套型降低 1～2 级，其原因是有效地减小了杂散电流的二次腐蚀。

4）当电解液对材料的加工性能并不因为加工参数的变化而引起剥落之类的显著变化、且加工条件在极限状态以下时，那么只要保持 Δ_b 不变，在设备条件允许范围内，根据式（4.1-49）比例关系，加工参数可以大幅度地改变，既可高速加工，也可低速加工，而精度、表面粗糙度基本不变。

5）有利于优选降低表面粗糙度的电解液，表面质量好坏与由线性加工或非线性加工无关。

由于使用倒置绝缘腔结构的阴极，小间隙套型的精度已与线性或非线性加工无关，这就为优选能降低表面粗糙度的电解液创造了良好的条件。如加工 45 钢、GH40、GH4169 等材料用 NaCl 电解液比 $NaNO_3$ 电解液的表面质量好，而加工 1Cr18Ni9Ti 材料则采用 $NaNO_3$ 电解液为好，加工钛合金使用 NaCl 与 $NaNO_3$ 的混合液较为理想。当然也需指出，这里所说的也仅是该材料在某种状态下的情况，由于原材料状态、锻造状态、热处理状态的不同，即使同一种牌号的材料，用同一种电解液加工，其表面质量也往往不同，不能一概而论。

综上所述，可以看出：用倒置绝缘腔结构的阴极小间隙



套型加工，可以使重复加工误差小于 0.02 mm，单件加工误差小于 0.02 mm，锥度接近于零。至于截面形状误差，则取决于阴极的设计制造精度，经过试加工修正阴极，使截面形状误差小于 0.05 mm 并不困难，修正到 0.02 mm 以内虽较为困难，但还是有可能做到。综合这四种误差可以看出：用倒置绝缘腔结构的阴极小间隙套型加工，保证 ± 0.03 mm 的加工精度不很困难，而保证 ± 0.05 mm 精度则很容易做到。

事实证明：在加工截面不太大，电解液流程较短的情况下，使用小间隙电解加工工艺是实现高精度、低表面粗糙度加工的有效工艺方法。

3.2　设备保障条件

为了能稳定实现小间隙、高电流密度、高电解液流速条件下的电解加工，需要下列保障条件：

1）保证电解液的过滤质量；

2）电解液泵的出口压力需要更高一些，注意供液和流场设计合理；

3）保证阴极刚性，防止振动；

4）套型加工时使用铜钨合金阴极，并取消火花保护；

5）加工型腔肘不允许产生火花，利用加背压或使出水端处于收敛状态来改善流场，能消除火花，并降低表面粗糙度。使用“高压腔”加工不仅能起到上述作用，还能平衡掉一部分反压；

6）采用混气电解加工有利于缩小加工间隙提高加工稳定性；

7）采用脉冲电流电解加工有利于缩小加工间隙。

3.3　典型应用

3.3.1　带冠叶片型面加工

利用小间隙非线性型腔加工方法对带冠叶片进行加工，叶片的型面精度要求为 ± 0.05 mm，最大倾角 $\theta_{max} = 60°$，表面粗糙度要求 R_a0.4 μm，毛坯为 GH40 材料的冷拉方钢，叶背的加工余量相差悬殊，最大加工余量为 11 mm，最小加工余量仅 0.5 mm。使用低浓度 $NaNO_3$ 电解液进行小间隙非线性型腔加工，先用 $\Delta_b = 0.09$ mm 的间隙加工叶盆，翻转装夹后用 $\Delta_b = 0.07$ mm 的间隙加工叶背。实际选用的电解液与加工参数符合图 4.5-59 中 GH40 电解加工特性曲线的第 1 条 $\eta\omega$-Δ 曲线，确定出叶盆的 $\Delta_{\theta max}$ 略小于 0.16 mm，则 Δ'_θ 略小于 0.07 mm（实测 Δ'_θ 为 0.06 mm）。

由于 Δ'_θ 已比加工精度要求 ± 0.05 mm 还小，所以没有必要按式（4.5-6）或确定的法向间隙来设计制造阴极，叶盆与叶背的阴极均按等间隙设计制造，不需试加工修正就可以直接在方毛坯上加工出精度为 ± 0.05 mm，表面粗糙度 R_a 为 0.4 ~ 0.3 μm 的叶片。

3.3.2　试片套型加工

试片的截面 2 mm × 21 mm，长度为 100 mm，毛坯为 5 mm × 24 mm × 150 mm 的 45 钢方料，用浓度 15% 的 NaCl 电解液加工（由图 4.5-58 所示加工特性曲线可知是线性加工），采用倒置绝缘腔结构的阴极，加工间隙 $\Delta_b = 0.06$ mm，进给速度 12 mm/min，在 100 mm 长度内尺寸偏差不超过 0.02 mm。

3.3.3　导流架套型加工

三种十字形导流架（图 4.5-64），材料为 1Cr18Ni9Ti，各部位的尺寸分别是：十字筋中部直径为 2.2 mm、6 mm 和 8 mm，筋厚为 0.5 mm、0.8 mm、1 mm，筋宽为 10.7 mm、23 mm、33 mm，筋高为 45 mm、47 mm、60 mm。毛坯是大于筋宽的园棒。使用不同浓度的 $NaNO_3$ 电解液加工（其加工特性见图 4.5-60，是非线性加工），采用倒置绝缘腔结构的阴极，加工间隙 $\Delta_b = 0.06$ mm，加工了数百件，其全长尺寸偏差均在 0.005 ~ 0.02 mm 范围内。

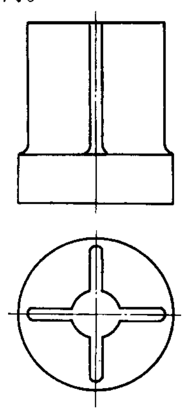


图 4.5-64　导流架示意图

3.3.4　叶片套型加工

截面为月牙形的叶片（图 4.5-65），叶片长 20 mm，毛坯为 12 × 16 mm GH40 方钢，使用倒置绝缘腔结构阴极，分两组进行加工：第一组使用一号阴极，24% NaCl，加工电压分别用 10 V、15 V、20 V，对应的加工速度分别为 6.6 mm/min、10.7 mm/min、15.6 mm/min，对应的电流密度分别是 394 A/cm^2、638 A/cm^2、866 A/cm^2，加工结果叶片全长范围内尺寸偏差 0.004 ~ 0.015 mm；第二组使用二号阴极，4% NaCl，加工电压分别用 10 V、15 V、20 V，对应的加工速度分别为 2.45 mm/min、3.97 mm/min、5.5 mm/min，对应的电流密度分别是 170 A/cm^2、256 A/cm^2、363 A/cm^2，全部加工叶片在全长范围内尺寸偏差不超过 0.02 mm。已加工了数千件，其对应加工特性曲线参见图 4.5-59，也是非线性加工。

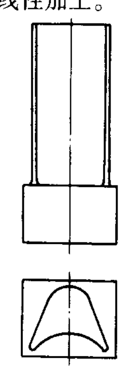


图 4.5-65　叶片示意图

3.3.5　涡轮转子叶片套型加工

某火箭发动机涡轮转子有两种，均为双级叶片，叶片截面均为月牙形，宽度为 12 mm 和 14 mm，长度为 15 ~ 25 mm，毛坯为直径 150 mm、厚 15 mm 和 17 mm 的 GH4169 钢的圆盘，叶片最小通道 2.5 mm，叶片形状精度 0.1 mm，表面粗糙度 R_a0.8 μm；使用 12% $NaNO_3$ 电解液，加工电压 20 V，加工间隙 0.06 mm，使用倒置绝缘腔结构阴极，已经加工了近百件合格的涡轮转子。

3.3.6　叶栅环叶片套型加工

火箭发动机叶栅环上有两种叶片，一种叶片截面为长月牙形，另一种叶片为异型叶片，宽度为 19 mm，长度为 25 mm。毛坯为直径 150 mm、厚 24 mm 的 1Cr18Ni9Ti 钢的圆盘，叶片最小通道 5 mm，叶片形状精度 0.1 mm，表面粗糙度 R_a0.8 μm；使用 12% $NaNO_3$ 电解液，加工电压 20 V，加工间隙 0.06 mm，使用倒置绝缘腔结构阴极，已经加工了近百件合格的叶栅环。

3.3.7 导向环叶片套型加工

某火箭发动机导向环有两种，叶片为内腔叶片，叶片截面均为月牙形，宽度为 12 mm 和 14 mm，长度为 15 ~ 25 mm，毛坯为直径 150 mm、厚 15 mm 和 17 mm 的 1Cr18Ni9Ti 钢的圆环，叶片最小通道 2 mm，叶片形状精度 0.1 mm，表面粗糙度 R_a0.8 μm；使用 12% $NaNO_3$ 电解液，加工电压 20 V，加工间隙 0.06 mm，使用倒置绝缘腔结构阴极，已经加工了近百件合格的导向环。

3.3.8 静叶栅叶片套型加工

某型号火箭发动机静叶栅有三种，叶片截面均为月牙形，宽度为 29 mm，长度为 25 ~ 35 mm，毛坯为直径约 300 mm、厚 33 mm 的铝合金圆盘，叶片最小通道 5 mm，叶片形状轮廓度为 0.16 mm，表面粗糙度 R_a0.8 μm；使用 12% $NaNO_3$ 电解液，加工电压 20 V，加工间隙 0.1 mm，使用倒置绝缘腔结构阴极，已经加工了数百件合格的静叶栅。

4 小孔电液束加工

小孔电液束加工（ESM），又称电液束打孔（ESD），其研究和应用于 20 世纪 60 年代中期始于美国通用电气（GE）公司，于 1970 年左右，开始应用于加工航空发动机涡轮叶片的冷却孔，孔径一般为 0.15 ~ 1 mm，但深径比（孔深/孔径）较大，最大可达 50:1。该加工方法一直是美国通用电气公司航空发动机零件的核心制造技术之一，其后英国、法国、德国、前苏联也都相继开发研究并逐渐在深小孔加工中得到应用。我国在 20 世纪 70 年代中期也开始进行研究，但因为玻璃喷管、特别是深径比大的玻璃喷管，制造比较困难，因此影响了该加工方法的工程应用。近几年来，北京航空制造工程研究所在加工工艺和玻璃喷管制造技术上有重大突破，在加工电参数选择、电解液组成、玻璃喷管制造和电极结构设计等方面都有所创新，已经成功应用于加工深小孔、多孔、排孔、横向椭圆连通孔，为我国航空制造解决了加工难题。本节将就电液束加工主要工艺特点及应用作扼要介绍。

4.1 电液束加工工艺要点

图 4.5-66 是电液束加工装置及其加工示意图。如同电解加工系统一样，其装置包括三部分。

1）机床及控制部分　用以安装工件、喷管，实现并控制喷管相对工件的加工送进运动；同时随工作台运动而使工件移位，以便在不同几何位置对工件进行小孔加工。

2）电解液系统　由较高压力的输液泵将电解液经由输液管道输向绝缘喷管，并由喷管喷出、形成一束射流喷向工件。

3）高压直流电源　其正极接工件，负极接阴极，阴极由金属丝或金属环构成。当电解液通过阴极时，使电解液流束“阴极化”而带负电，当其喷射到工件上时，则在工件喷射点上去除材料；随着阴极相对工件的进给，在工件上不断去除材料而逐渐形成一定深度的小孔。

实验研究表明，电液束加工实际去除的金属量，大大超过由法拉第定律所计算的电化学阳极溶解的金属量。这说明，去除金属的作用不只限于电化学阳极溶解；除此而外，还存在别的溶解作用。大多数研究专家认为，除了电化学阳极溶解作用之外，还有酸性电解液（通常用 10% H_2SO_4 或 14%HCl 水溶液）对工件材料的化学腐蚀作用。但实验结果还显示，实际去除量比前述电化学阳极溶解作用和化学腐蚀作用两者计算的总和还要大得多，故研究者们推论：电液束加工去除材料，是在高电压（高电位梯度）、大电流密度以及喷射点处局部高温（特有的现象是喷射点处辉光放电）条件下特殊的电解、强烈的化学腐蚀、或者还有其他去除材料作用的复合加工结果。

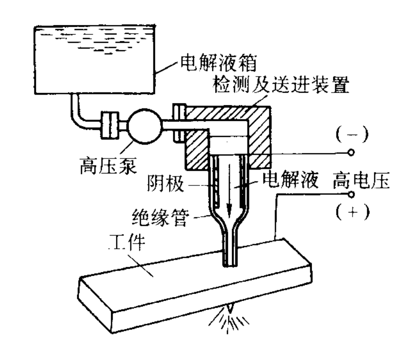


图 4.5-66 电液束加工装置及其加工示意

4.1.1 电液束加工过程及相应控制

电液束加工用的电源是高压直流电源，其电压比普通电解用的高得多，常用 300 ~ 1 200 V，近期研究成果也可采用 100 ~ 200 V 的直流电源；电流不大，一般小于 4 A，但同时加工多孔时，电流需要 10 ~ 20 A；由于加工孔径小（0.15 ~ 1 mm），则其电流密度可以高达数百 A/cm²。在如此高电位梯度、高电流密度的电场条件下，电解液流经特殊的喷管（图 4.5-67）时被阴极充电而成为“阴极化”的电解液射流，在整个加工过程一直保持稳定充电，其物理特征则表现为由喷管喷出到工件间的流束产生辉光放电，而且在整个加工过程都稳定保持这一现象（参见图 4.5-68）。

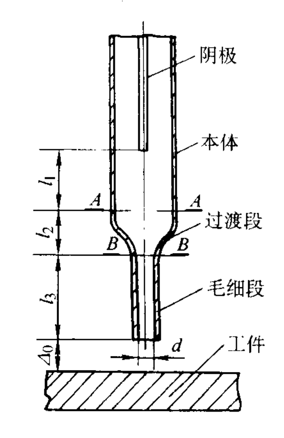


图 4.5-67 电液束加工用阴极及喷管

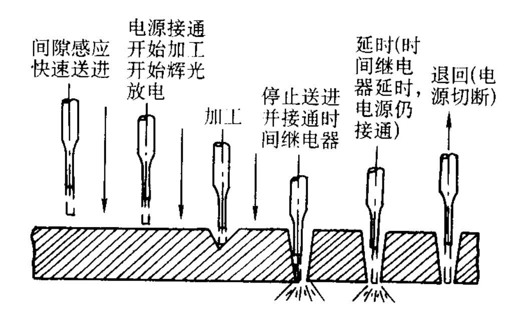


图 4.5-68 电液束小孔加工过程及其控制

为了保证小孔电液束加工过程稳定、协调地进行，要设计如图 4.5-68 所示的必要控制程序。首先喷管快速接近工件，当达到一定间隙量时（由间隙感应装置反馈控制信号），则控制喷管运动速度降低到加工进给速度并接通加工电源，此时喷射到加工间隙中的电解液束流开始有辉光放电，电液束小孔加工开始；随着加工送进运动，喷管由接近而逐渐插入工件，辉光放电一直保持，加工过程稳定进行；到小孔打

通时，则由控制加工时间的时间继电器，或由测定加工深度的位移信号反馈，控制喷管停止送进但电源仍保持接通。用此延时关断电源的办法，适当增加小孔出口端的直径，由此可以减小所加工孔进口与出口端直径差，同时还可为出口端锐边倒角。电源切断后，喷管快速退回，工作台移动一个位置，即变换孔位，又重复循环加工下一个孔。在一个循环过程中加工电压、加工电流随时间（加工孔的深度）的变化如图 4.5-69 所示。图中表示，在小孔进口端，即开始加工时，加工电压保持较低值，相应电流也较低；加工送进一段时间后控制电压升高并保持为另一更高的电压，相应电流也增大。进口段如此控制是避免小孔进口端直径太大；再辅以出口端延时断电，两者结合，控制所加工孔的进、出口端的锥度。图上还表示了，当喷管破坏（如断裂）时，喷射流束直径增大，相当于加工面积增大，故电流突增；而另一故障为喷管堵塞（这在加工中也偶有发生），则电流突降。对于上述故障，都有专门设置的电流信号反馈装置控制切断电源、停止加工。

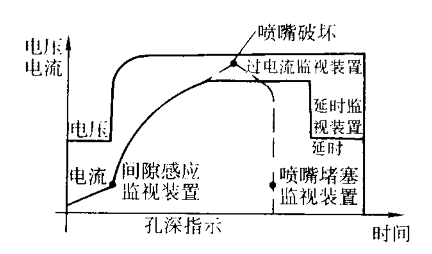


图 4.5-69　加工电压、电流随加工时间的变化

4.1.2　喷管结构及阴极位置

喷管是电液束加工装置中的关键部件，对加工孔径及加工过程的稳定性有着重要作用。其结构示意如图 4.5-66（局部）和图 4.5-67 所示。一般，喷管由石英玻璃制造，这是因为石英玻璃既是很好的绝缘材料，同时又容易制成如图 4.5-67 所示的倒酒瓶形状，即包括喷管本体段、毛细段及其间必须的过渡段。毛细段决定了电解液射流的直径及喷射流稳定性。从流体动力学分析，毛细段的内径 d 和长度 l_3 都是重要参数。本体段作为电解液的主要流通部分，同时在其中要便于安置阴极。为了保证流动过程由大截面积的本体段向小截面积的毛细段的稳定过渡，而不是突然收缩，以保证电解液由毛细段喷出后能够形成稳定的喷射流束，设计一定长度的过渡段 l_2 很有必要。

阴极可以设计成管型（图 4.5-66），也可以是丝状（图 4.5-67），后者比较容易调整其在喷管中的位置。阴极材料需选用抗酸蚀的金属，如 1Cr18Ni9Ti 不锈钢或钛合金，如有需要，还可选用铂金（Pt）丝。

阴极在喷管中起着将电解液阴极充电或“阴极化”电解液的作用，因此要特别注意保证阴极在喷管中的适当位置，即能够调整阴极端面到过渡段开始截面 $A-A$ 的距离 l_1（参见图 4.5-67）以使 l_1 保持为合适的距离，它对加工电流和喷射流束的稳定性有着重要影响。有资料推荐，当毛细段内径≤0.8 mm 时，l_1 在 6.4～19 mm 范围内选取较为合适，适当调整 l_1 的大小可以适当控制加工孔径大小及加工过程的稳定性。试验中发现，阴极丝太靠近毛细段，即 l_1 太小，会影响电解液在毛细段中的流动；当 $l_1<6.4$ mm 时，通过毛细段喷出的电解液流束将缩小为一点，使加工孔径无法控制，致使实际加工孔径大于所希望加工的孔径。l_1 过小，还会大大缩短喷管使用寿命，使毛细段容易破裂。而如果 l_1 超过 19 mm 或更大，则电解液中所含气体容易形成气泡，使得加工过程变化无常。

通常，喷管毛细段外径不能做得太小，否则难以保证毛细段具有一定的强度与刚性，难以避免其在加工过程中机械碎裂。先进的制造水平可以获得外径为 0.5 mm 或略小一点的毛细段，内径可以做得更小，当然这与制造水平和玻璃喷管毛细段的长度有关。例如可以制成内径为 0.02 mm 的毛细管，但外径不能做得太小；用此喷管可用来实现 0.025 mm 的微孔加工。当然，此时喷管不能进入加工孔内，因毛细段外径不能做得比 0.025 mm 还小。加工如此小直径的微细孔，电解液必须严格过滤，否则，容易堵塞喷管毛细段。以下给出一组实例数据，以加深读者感性认识。

在 In102 镍基合金（Ni 基，Cr 15%，Co 3%，Mo 3%，W 3%，Fe 7%，Al 0.5%，Ti 0.6%，B 0.006%）导管上加工直径为 0.43 mm 的小孔，导管壁厚为 1 mm。喷管毛细段外径 0.36 mm，内径 0.32 mm，电解液为 10% H_2SO_4 水溶液，供液压力为 0.28～0.42 MPa，加工电压为 500 V，电流为 300 mA。

当选择 l_1 在 6.4～19 mm 范围内时，所加工孔径为 0.43 mm，经加工 10 000 个孔后检查，喷管毛细段端部仍基本无变化。

当调整 $l_1<6.4$ mm 时，加工孔径接近 0.5 mm，且孔壁质量不好，喷管寿命降低，加工不到 100 个孔，就要更换喷管。

当 $l_1>19$ mm 时，则加工孔径变化不定，尺寸偏小，在 0.38～0.43 mm 范围内变化；更严重的是加工过程中易产生气泡，影响加工正常进行。

还要特别指出，喷管制造中、毛细段的制造特别困难，这是电液束加工应用的关键难题。如上例中所介绍的毛细段外径 0.36 mm、内径 0.32 mm，则其壁厚只有 0.02 mm，可以说，这是喷管制造中所能达到的世界先进水平。而且在如此小直径（0.36 mm）、如此小壁厚（0.02 mm）的情况下，能稳定加工 10 000 个孔而喷管不碎裂，的确这又体现了加工工艺的先进水平。在实际工程中，如何保证毛细段内径尺寸精度、外径尺寸（壁厚）的相应精度、保证毛细段强度、刚性、保证加工过程不发生断裂，均是保证电液束小孔加工精度及加工过程稳定性的关键，也是该项工艺能否广泛应用的关键。近几年来，我国北京航空制造工程研究所已经研制了专用设备，采用机拉法制造石英玻璃喷管，能保证喷管制造精度，不仅制造单管，还能制造组合喷管，进行排孔、多孔加工，已经在航空发动机零件各类小孔加工中发挥作用，解决了加工难题。

4.1.3　电解液

电液束加工都采用酸性电解液，常用质量百分浓度为 10%的 H_2SO_4 或 14%的 HCl 水溶液。之所以采用酸类电解液，是为了便于溶解小孔内电解产物，以避免堵塞喷管毛细段。采用中性盐水溶液，如 NaCl、$NaNO_3$ 水溶液也能进行电液束小孔加工，已经得到试验验证，但容易出现喷管堵塞。除了电解产物、电解液中的夹杂物堵塞毛细管外，在加工间歇期间，中性盐的结晶体也会堵塞毛细管。为此，在下次加工前毛细管要用稀酸浸蚀一会，使堵塞物被酸溶解。还有，为防止堵塞，电解液系统的过滤特别严格，要定期清洗过滤器。

常用输液压力为 0.4～2.0 MPa，加工孔深增大，供液压力要高些。由于电液束都用于小孔类加工，故所需流量不大。

4.2　电液束加工的应用

电液束加工的产生，首先就是为了加工深小孔，如对于孔径 0.08～0.8 mm，深径比达 50/1 的深小孔，电液束加工

属首选方法。美国通用电气公司，已经在生产线上成功应用电液束加工航空发动机涡轮叶片的大量冷却孔。

除了在高温耐热合金、高强材料上加工直小孔之外，利用毛细管适当弯曲以改变喷射流方向，还可在叶片通气孔之间加工横向通孔（参见图 4.5-70）。

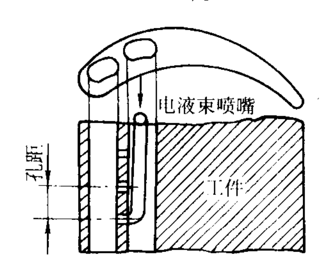


图 4.5-70 横向通孔的电液束加工

表 4.5-10 给出了一组典型加工实例，在不同材料工件上加工了 2 400 个以上、不同直径的小孔，所列有关数据很有参考价值。

表 4.5-10 典型加工实例

序号	材料	加工孔径 /mm	喷管毛细段/mm		间隙 /mm	直流电压 /V	进给速度 /mm·min^{-1}	压力 /MPa	不进给时间 /s	最大电流 /A
			内径	长度 l_3						
1	A	0.51 ~ 0.56	0.36	10.16	2.03	360 ~ 400	1.27 ~ 1.53	0.46	7	0.47
2	A	0.64 ~ 0.71	0.36	10.16	2.03	540 ~ 560	1.27 ~ 1.53	0.46	7	0.57
3	B	0.33 ~ 0.48	0.20	10.16	2.54	440	3.56 ~ 4.06	0.42	6	0.24
4	B	1.40 ~ 1.65	0.76	—	—	375 ~ 525	0	0.21	35	1.8
5	B	0.79 ~ 0.89	0.51	10.16	3.56	600	3.05	0.35	10	1.2
6	C	0.15 ~ 0.20	0.10	10.16	0.76	440	2.54	0.63	—	0.07

表 4.5-10 中所列加工的三种材料是：材料 A 为 In102 镍基合金，其组成前已给出；材料 B 为 Udimet700 合金（Ni 基，Cr 15%，Ti 3.25%，B 0.025%，Al 4.25%，Co 17%，Mo 5%，C < 0.015%）；材料 C 则为 Hastelloy C 合金（Ni 基，Cr 15.5%，Mo 16%，W 3.75%，Fe 3.5%，C < 0.08%）。对于不同材料需要选择不同电解液加工：对材料 A 和 B 选用电解液为浓度 172 g/L 的 H_2SO_4 水溶液；对材料 C 则采用 148 g/L浓度的 HCl 水溶液。表中的间隙是指喷管毛细段端面到工件表面间在开始加工时的距离（参见图 4.5-67 中所示 Δ_0）。表中不进给时间是指在孔打通时喷管停止运动但延时关闭电源的加工时间；由表中可以看到，第 4 组加工的喷管不进给，即相对工件静止同样可加工小孔，不过以同样直径的毛细管加工的孔径更大些。实例中以内径为 0.76 mm 的喷管加工成孔径为 1.40 ~ 1.65 mm 的孔，其孔径相对于喷管内径的扩大量比送进加工时的大得多。

应当特别指出，上述加工试件经显微照相检查，加工表面都不存在任何冶金缺陷，无表面应力，无表面裂纹，无加工热影响区，表面光滑，表面粗糙度达 $R_a \leqslant 3.2\ \mu m$，更低的可达 $R_a 0.8\ \mu m$。如此优异的加工表面质量，非常有利于增加航空发动机叶片类零件的疲劳强度和使用寿命。电液束加工的重要表面质量特点，其形成机理还有待深入研究，但测试结果是明显的。基于此，或许可以探索一条无缺陷表面微细加工技术的新途径。

5 电解擦削

电解擦削，又称电化学擦削，是基于电化学阳极溶解原理，利用不同类型、不同功能的电解擦削头（电解擦削阴极）对金属零件进行定域、定量电解去除或电解光整加工的一项新型半精加工、精加工工艺，其技术构思新颖、简便，是对传统电解加工技术的一项巧妙创新。它具有设备简单、操作方便、加工速度快、生产成本低、加工精度高、应用对象广、技术经济效益显著等特点，具有推广应用价值。它既具有电解加工的优点，即只要是金属零件都可加工，不受材料强度、硬度、刚度的限制；同时它又像用各类锉刀锉修零件那样，具有加工灵活性。适用于光整加工、精修加工金属零件外形和内孔的二维、三维型腔、型面，特别适用于淬火后零件的型孔、键槽和模具型腔的精修，在制造工程领域将发挥积极作用。

5.1 电解擦削装置简介

5.1.1 电解擦削设备

电解擦削设备由三部分组成：电解擦削电源、电解液槽、专用电解擦削阴极，如图 4.5-71 所示。

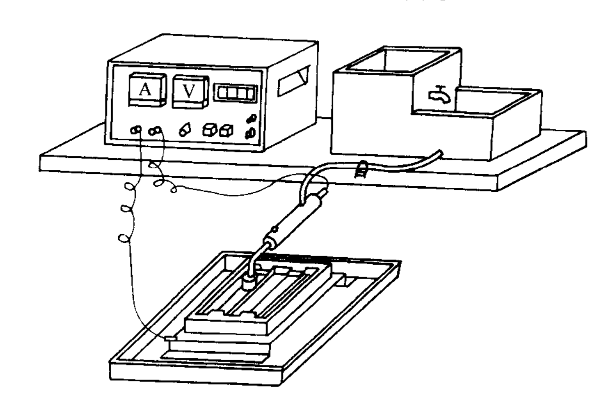


图 4.5-71 电解擦削设备

电解擦削时，工件接直流电源的正极（阳极），电解擦削头接直流电源的负极（阴极）；输液管连接电解液槽的出液孔及擦削阴极的进液孔；电解液槽在工件之上一定高度放置，以便利用高度差使电解液由槽中流至阴极并供给擦削工作区；正式擦削前，松开管夹并确认电解液流到加工区后，再启动直流电源，手握电解擦削阴极相对工件加工面往复运动进行“电解擦削”。擦削时，电解擦削头接触工作面区域对工件进行电化学阳极溶解（由于擦削头包有一层绝缘布，阴极与工件间不会短路），随着擦削头不停移动，则电解去除区域不断改变；且随着移动，电解擦头又不断地将电解产物擦拭、清除。如此反复并更换加工区，实现对工件加工面的电解擦削。其间也可间歇操作，以电解液冲洗、或专门清理擦削面；然后根据擦削结果决定是否结束操作，还是继续进行。一次擦削结束或暂停时，先关断电源，再夹紧管夹 5 以切断电解液流动，最后清理工件擦削面。

5.1.2 电解擦削电源

电解擦削电源的基本要求是：50 Hz、220 V 交流输入，额定输出电压为 24 V，但要求在 5 ~ 24 V 范围内可调并稳压，额定输出电流随擦削头工作面积的变化而变化，电流密度一般为 0.1 ~ 2 A/cm^2，精加工时，电流密度要小一点，粗

加工时，电流密度要大一点。与电解加工电源一样，还需设置过流保护、短路保护及相应报警指示等功能。

为了实现微量去处金属，也可采用直流脉冲电源。

5.1.3 电解擦削阴极

电解擦削阴极是电解擦削加工中特有的、必要的工具。正是它，显示了电解擦削加工的特点。图 4.5-72 给出了一种典型应用的多功能电解擦削阴极的结构。其主体为通用阴极柄 5，阴极擦头 1 可根据加工类型更换，由止动螺钉 2 固紧。导电则通过导电柱 6 连接电源负极；电解液由软管接通管接头 4 流向阴极擦头。图中所示阴极擦头端头由阴极及有机玻璃制的绝缘套构成，其具体形状、大小可根据加工需要设计；加工间隙可以调整绝缘套的位置来保证。

作为实施电解擦削的工具，依据加工对象的不同要求，电解擦削阴极头大体上可设计成柔性、刚性、弓弦式等三类不同结构的阴极擦头形式。它们分别应用于不同场合，根据需要安装到通用阴极柄上。

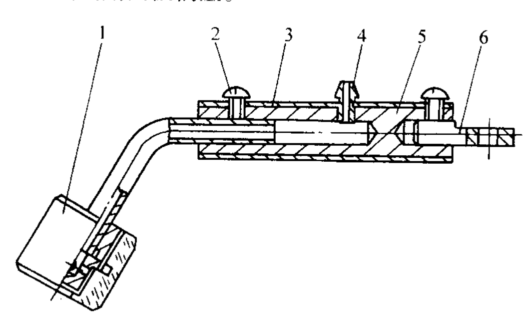


图 4.5-72 多功能擦削阴极

1—可换阴极擦头；2—止动螺钉；3—绝缘套；4—进液管接头；5—通用阴极柄；6—导电柱

1）柔性阴极擦头　其结构见图 4.5-73。所谓“柔性”，是指在电解擦削时，擦削头工作部分与工件间的接触是柔性的，它是在导电性能良好的金属阴极上包覆层数不等的、多孔且能吸液的柔软绝缘物。电解液通过阴极体上的出液孔浸湿柔性包层并到达加工区。

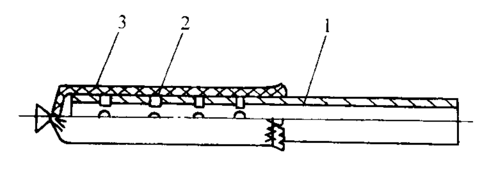


图 4.5-73 柔性阴极擦头

1—阴极体；2—出液孔；3—柔性包层

柔性阴极擦头本体多用紫铜管等型材制作，因为紫铜管导电性能优异，延展性也好，易于做成符合加工面要求的各种形状。依据电解擦削的工作特点，要求柔性包层绝缘、柔软、光滑，且耐热、耐磨。目前常选用的柔性包层为涤棉布。柔性包层的厚度决定电解擦削时电解间隙的大小。包层薄，则间隙小，电流密度提高，擦削速度增大。但不能太薄，太薄则电流密度过大，电解产物太多及电解时的焦耳热都可能来不及排除，影响擦削过程正常进行，甚至可能烧毁包层以致阴极本体与工件短路。当然包层也不能太厚，太厚则降低生产效率且增加了电流通过包层的电能消耗。一般包层的单边厚度在 0.6～2 mm 范围内选择，粗擦削时选薄些，精加工则选略厚一些的包层。

2）刚性阴极擦头　其结构见图 4.5-74。所谓“刚性”，即电解擦削时工具与工件刚性接触，即绝缘屏蔽套与工件刚性接触。电解液从弯管流向阴极头，经阴极头外壁均布的小孔流入其与绝缘套形成的环形腔，而后到达擦削区（如图 4.5-74 中箭头所指）。

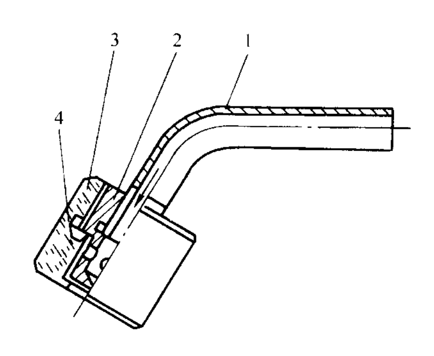


图 4.5-74 刚性阴极擦头

1—连接弯管；2—阴极头；3—绝缘套；4—调整垫

加工间隙通过改变调整垫的厚度来保证，通常控制在 0.5～1.5 mm 范围内。刚性擦头比柔性擦头的加工效率更高，且不易短路，使用更安全。调整适当加工间隙，可用更大电流密度加工，因为其电解液供应比柔性擦头更充分。

依据加工对象不同，已设计了多种不同结构形式的柔性、刚性阴极擦头供选用。典型结构方案参见表 4.5-11。

表 4.5-11 柔性、刚性阴极擦头结构一览表

柔性阴极擦头		刚性阴极擦头	
外圆加工擦头		小孔擦头	
内孔加工擦头			
键槽加工擦头		圆孔擦头	
窄缝加工擦头		方孔擦头	
型腔加工擦头			
型孔加工擦头		多孔擦头	

3）弓弦式阴极擦头　弓弦式阴极擦头，是在导电性能良好的金属丝上包覆数层吸液性好、薄而致密、柔软的绝缘布，再将此“柔弦”安装到弓形框架上，就构成了可供电解擦削的阴极擦头，其结构如图 4.5-75 所示。由于作为擦削工作部分的阴极丝柔软、细长，且整体结构形如常用的手锯，故其适用于擦削深小孔、长细沟槽；有时将多件小孔串联同时进行擦削，可以提高效率。

应当指出的是，这种阴极头受结构所限，擦削时电解液供给和电解产物排除都相当困难，尤其对深小孔电解擦削抛光，应特别注意并设法解决。



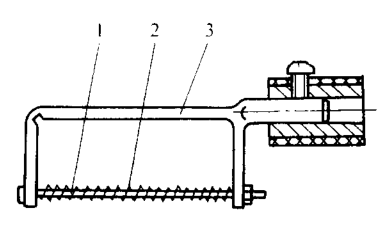


图 4.5-75 弓弦式阴极擦头
1—金属丝；2—柔性包层；3—弓形框架

5.2 电解擦削工艺要点

5.2.1 电解液供给及电解擦削工作方式

根据加工零件的形状、被擦削工作面的几何结构以及电解擦削阴极头的特点，可采取不同的电解液供给方式，同时这又影响电解擦削的操作方式。综合考虑，依据不同工作场合，大致可以采取四种供液方式：即浸液、渗液、冲液和沾液，以下分别介绍。

1）浸液法　将工件的加工面浸入电解液中进行电解擦削加工，如图 4.5-76 所示。这种工作方法的优点是简单便利，缺点是加工面浸在电解液中不便观察，且非加工面也容易产生杂散腐蚀。这种方法主要适用于模具型腔表面的加工。

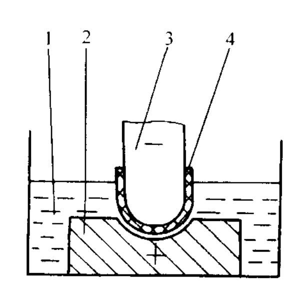


图 4.5-76 浸液法
1—电解液；2—工件；3—阴极擦头；4—包层

2）渗液法　如图 4.5-77 所示，电解液从高处放置的电解液槽、经输液管流入电解擦削阴极，再经由阴极擦头上的若干小孔渗透过绝缘包层而供给加工区。比较浸液法，渗液法中的电解液是在重力作用下而有所流动，排除电解产物、带走热量的效果更好些；再加上阴极头的擦削运动，都有利于提高加工效率和改善表面质量，故这种方式在型面、型腔、型孔的精密擦削加工中应用较多。

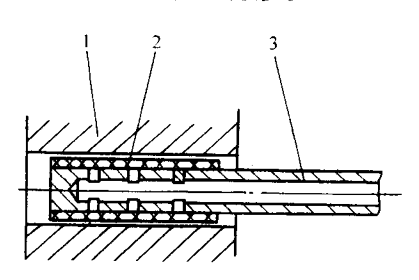


图 4.5-77 渗液法
1—工件；2—包层；3—擦削头本体

3）冲液法　有外冲液法和内冲液法两种。电解阴极擦头，不管是刚性结构还是柔性擦头，都可以从外部专门用一供液管输液（参见图 4.5-78），这就是外冲液法；而相对地，由高处安置的电解液槽、经输液管流到阴极本体内部，再流向阴极头插削区，此称内冲液法（图 4.5-79）。冲液法可获得更好的供液条件，电解产物易排除，加工效率、加工表面质量都较高。

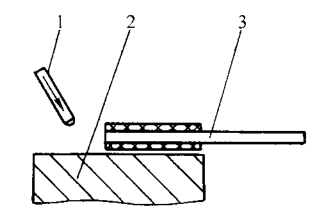


图 4.5-78 外冲液法
1—供液管；2—工件；3—阴极擦头

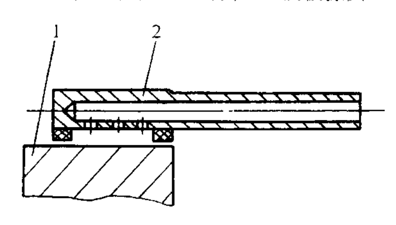


图 4.5-79 内冲液法
1—工件；2—阴极擦头

4）沾液法　该方式适用于柔性阴极擦头，将其外绝缘层沾上电解液对工件进行电解擦削；间歇清除电解产物，再沾电解液继续擦削。这种方法比较简便，特别适合于大型工件的局部擦削或局部蚀刻花纹、文字等加工。由于每次只能沾少量电解液，其电解产物排除条件较差，易发热，故生产效率不高、擦削加工时间长，中间要多次间断加工以便及时清理擦削工作面。

上述供液方式或者说电解擦削方式，要结合具体条件、具体加工要求灵活选用，可以单独用一种，也可以不同加工阶段选用其中几种方式组合。

5.2.2 电解擦削的操作过程

综观前述供液方式及擦削方式，比较一般电解加工，可知电解擦削的供液条件都比较差，因而电解擦削产物的排除和擦削过程焦耳热的排除都比较困难；另一方面，小巧的阴极擦头又提供了机动灵活的工作方式。为了在保证产品精度、产品表面质量先决条件下提高擦削效率，可采用断续、分步、分层的操作过程。

所谓“断续”，是指擦削过程断续进行，即不是一直连续进行，中间有间歇、休整、清理工作面和阴极头，特别是柔性阴极外绝缘包层更要及时清理、降温。

所谓“分步”，就是将擦削过程分为粗擦、半精擦和精擦几个阶段进行：粗擦时选用小间隙，粗擦头，电压和电流都大些，供液力求更充分一点，有利提高工效；而精擦时则要特别注意保证尺寸精度和表面质量，选用精擦头，电压、电流都选用较低的规范。

所谓“分层”，是指对那些较为大型复杂的型面，如凸凹共存、深浅不一的模腔、面板进行擦削和刻字时，可以针对不同部位、不同区域、不同层次采取不同的擦削方式，以求加工精度、表面质量和加工速度较为协调。

总的看来，电解擦削依然属于电解加工范畴，其加工精度、表面质量、去除速度等工艺指标受以下因素的影响。

1）工件材料（组成及热处理状态）及相应电解液选择（成分、浓度、温度）。

2）加工电压、加工电流密度。

3）加工间隙。

4）供液及擦削方式。

5.2.3 脉冲电流电解擦削的特点

电解擦削中工件的去除主要靠电化学作用，因此若要提



高加工精度，实现精确微量去除，则必须提高电化学溶解作用的定域性。为了做到微量去除，普通的直流电解擦削只能通过减小电流密度来实现，但电流密度的降低并不能提高阳极溶解的定域性，相反，还增加了杂散腐蚀，使擦削精度和表面质量降低。脉冲电流电解擦削在脉冲电流通过的时间（脉冲宽度）内发生电化学阳极溶解，在脉冲间歇时间内极间电化学反应物和析热被冲走，因而可以在脉冲宽度时间内采用较大的电流密度，而通过减小脉冲占空比来降低总体电化学溶解作用而减小去除量，同时又可提高阳极溶解的定域性，提高加工精度和表面质量。下面的试验结果给出了脉冲电流电解擦削的规律。其试验条件是：电解液以 $NaNO_3$ 和 Na_2SO_4 为主另加少量酒石酸钾钠、NaOH 等添加剂，试件材料为 3Cr2W8，电解液温度为 14℃，工件表面原始粗糙度 R_a0.80 μm。

1）脉宽的影响　通过实验得出，脉宽与表面粗糙度 R_a 的关系如图 4.5-80 所示。

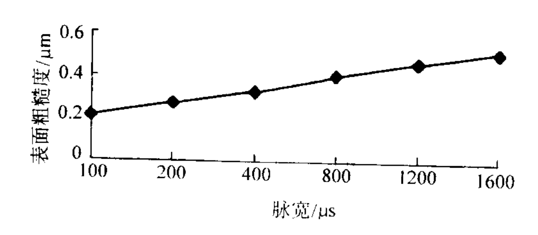


图 4.5-80　脉宽与表面粗糙度 R_a 的关系

图4.5-80 的结果表明：相同条件下随着脉宽的减小，表面粗糙度 R_a 的值相应减小。这说明采用窄脉冲加工能降低加工面的表面粗糙度。分析其中原因，可以认为在窄脉冲加工时，在脉冲加工时间内反应产物和析热很少，使得极间电解液在脉冲间歇时间内能够达到充分的更新和恢复。

2）占空比的影响　图 4.5-81 表明，在占空比减小的情况下，脉冲电流电解擦削可获得高质量的加工表面。这是因为在脉冲间歇时间内加工区的电解产物、析热以及析气等可以得到更充分的排除，使电解液的流场和温度场更加均匀，改善了加工表面的质量。但试验结果表明，当占空比过小时，表面粗糙度降低不太明显。

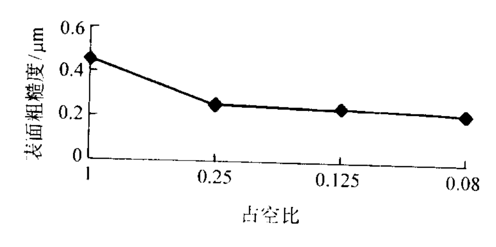


图 4.5-81　占空比与表面粗糙度的关系

3）加工电压的影响　图 4.5-82 表明，表面粗糙度 R_a 先是随着电压增大而减小，然后又有所上升。其原因可以这样分析：当间隙等加工条件一定时，在小电压范围内，随着电压的升高，电流密度增大，则有助于 R_a 降低；而电压进一步提高，电化学溶解作用增强而使电解产物和析热增多，在脉冲间歇内不能充分排出，从而又导致表面粗糙度 R_a 增大。因此，存在一个适当的电压范围，表面粗糙度 R_a 最小。因此在实际擦削过程，应选择合适的加工电压（电流密度），过大或过小都不合适。

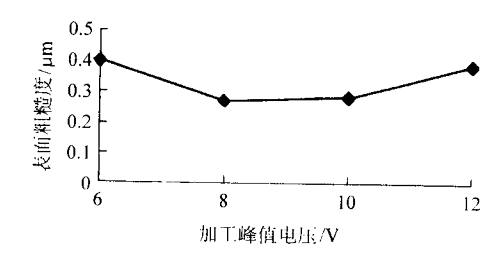


图 4.5-82　加工电压与表面粗糙度的关系

5.3　应用实例

电解擦削在零件的光整加工以及零件超差后的返修，在模具型面、型腔光整加工及返修，在标牌刻字、图案刻印，甚至在大型设备的维修中均发挥积极作用。以下将其典型应用作一介绍。

5.3.1　窄长键槽、深小孔精加工

这是最能发挥电解擦削特长的典型实例。如图 4.5-83 所示某大型齿轮上的窄长键槽，其精度和粗糙度要求用一般机械加工难于保证，而用专门键槽拉床则费用太高。工厂选用先粗刨再电解擦削精加工侧面和底面，重点是精修键槽两侧与根部（图 4.5-84）。加工中采用半圆形柔性阴极擦头（图 4.5-85）。为了保证加工要求，电解擦削过程需多次仔细检测。其加工电压为 14 V；工作电流 20～40 A；选用特配的 88－1 型复合电解液，浓度 18%，控制温度在 20～30℃范围内。

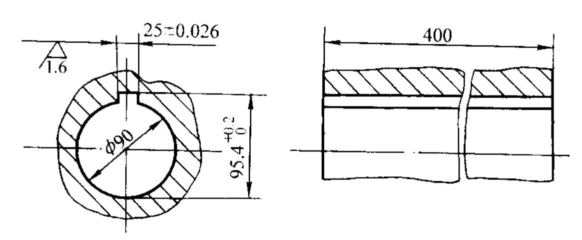


图 4.5-83　窄长键槽局部尺寸

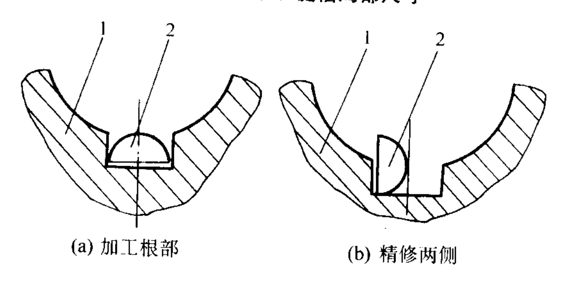


图 4.5-84　电解擦削键槽

1—工件；2—阴极擦头

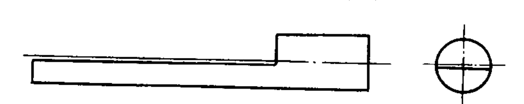


图 4.5-85　半圆形柔性阴极擦头

图 4.5-86 所示为一大型 6 000 kW 汽轮机上的喷嘴，其小端孔径只有 φ4.5 mm，而锥孔深度达 103 mm，锥面粗糙度要求 R_a0.4 μm，材料为 2Cr13 不锈钢。选用通常机械加工方案难以达到如此高的要求。工厂先采用电火花加工锥孔，留 0.2～0.3 mm 的余量，再用电解擦削锥孔的方案，较经济、高效达到零件设计要求。所用的锥形擦头如图 4.5-87 所示，阴极头材料为 H62 黄铜，阴极头的外包层是厚度为 0.6～0.9 mm 的柔性绝缘布。加工电压为 12 V，工作电流为 15～25 A，电

解液为89－2型复合电解液，浓度20%，工作温度控制在20～30℃范围内，锥孔经电解擦削后，用Al_2O_3微细研磨粉稍加擦拭研磨，去除电解产物膜，即得到光亮的锥孔表面。

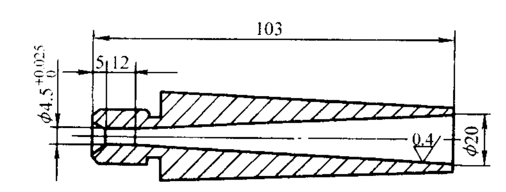


图4.5-86 汽轮机上喷嘴锥孔局部

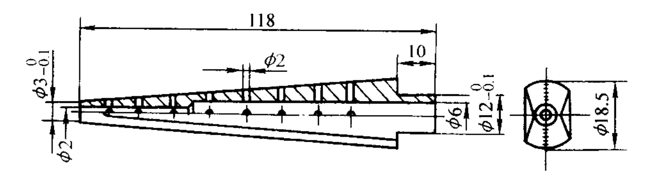


图4.5-87 电解擦削锥孔用柔性阴极擦头

图4.5-88为深径比特别大的台阶型深小孔，零件材料为30CrMnSi，淬火硬度65～74HRC，小孔精度和表面粗糙度要求相当高。该深小孔加工难题的解决特别显示了电解擦削的优点。其加工程序同前述锥孔一样，但采用了弓弦式阴极擦头擦削（图4.5-89），供液采用浸液式，即将工件和阴极擦头都浸在电解液中。对于如此大深径比的小孔擦削抛光，如何有效防止不圆度、锥度、不平行度都要靠仔细操作、及时检测来解决。

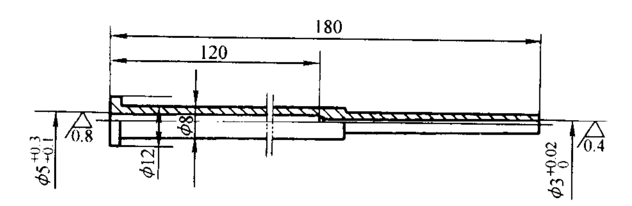


图4.5-88 深径比特别大的深小孔零件

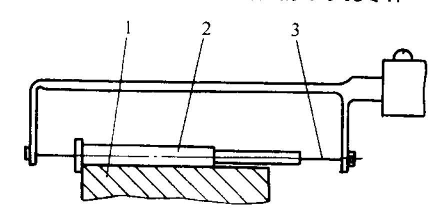


图4.5-89 深小孔抛光示意图

1—阳极导电块；2—工件；3—弓弦式阴极擦头

对于硬质合金制造的拉丝模，其孔深虽不大，但为提高抛光效率，也可将尺寸相同的拉丝模装成一串，采用图4.5-90所示的弓弦式阴极擦削头擦削。还有如图4.5-91所示的花键槽，为提高工效，也可采用整体柔性阴极擦头擦削，而不是逐个键槽加工。

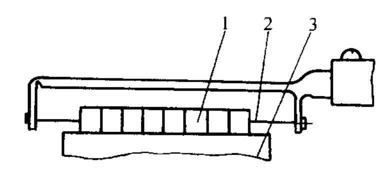


图4.5-90 拉丝模内孔的串联抛光

1—拉丝模；2—弓弦式阴极擦头；3—阳极导电块

5.3.2 模具型面光整加工

电解擦削为模具型面、型腔光整加工提供了一条新途径。它既可以用于机械加工后光整加工型腔、型面；也可以用于去除电火花后的表面变质层，提高表面精度和表面质量；还可应用于废旧模具的返修以延长模具使用寿命。

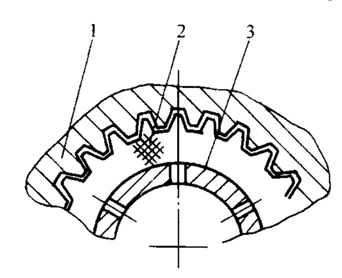


图4.5-91 花键槽整体擦削示意图

1—工件；2—柔性包层；3—阴极

图4.5-92为排气扇罩模具型腔图，其加工面积高达1 197 cm^2，型面光整加工原来由手工抛光完成，费工费时还难达到低表面粗糙度。后改为机械加工后进行电解擦削，表面由机械加工后的 R_a = 3.2～6.3 μm 降低到 R_a = 0.4～0.8 μm，只用了95 min。为了提高加工效率，采用了工作面积较大的弯头柔性阴极擦头（参见图4.5-93），而为了及时排除电解产物和减少加工区的温升，采用内渗、外冲综合供液方式，由此电解液流量增加，既提高了表面质量，又有利于加工稳定。电解液为88－1型复合电解液，浓度18%，电解液温度控制在25～35℃。加工电压为12 V，工作电流为80～100 A。

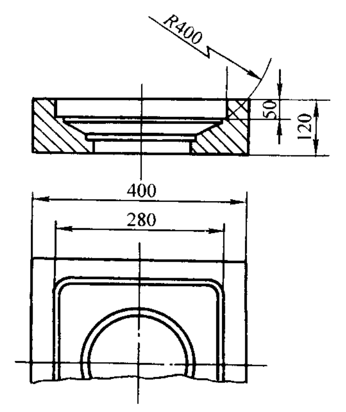


图4.5-92 排气扇罩模具型腔

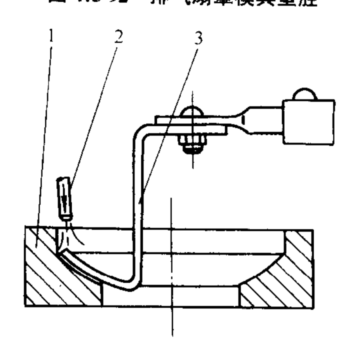


图4.5-93 用柔性擦头抛光示意图

1—工件；2—外冲供液管；3—阴极擦削头

图4.5-94所示为用电解擦削修复模具前后的比较。该冲压模长时间使用后磨损严重，下模型面凸出的顶部弧面已向下不均匀磨损近3 mm，形成了一个明显的平面（参见图4.5-94a）。按常规，此模具只有报废。而采用电解擦削进行修复后，其型面如图4.5-94b所示，已达到精度要求，型面粗糙度达到R_a0.4 μm，又可重新投入使用。修复操作方式同图4.5-93类似，采用弯头柔性阴极擦削头。修复过程是



先将下模低凹部分普遍向下深修 3～4 mm；然后重点修复顶部弧面，使相对高度达设计要求；最后再对整个型面进行精细擦削以达到要求的形状精度和表面粗糙度。粗修时电压为 14 V，电流为 30～40 A；精修时电压为 10 V，电流为10～15 A。

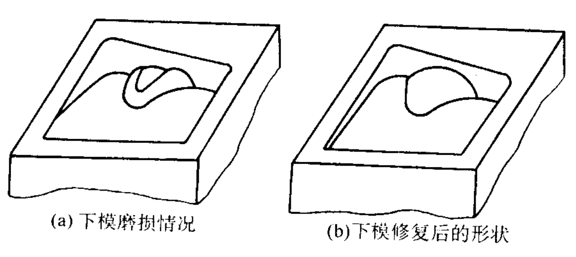


图 4.5-94　电解擦削修复模具

电解擦削还可用于大型设备的局部修整。例如一进口的数控加工中心，使用中因故障撞车，致使机床主轴定位端面发生变形，使约 5 cm² 的表面凸出 0.5 mm 左右。由于主轴精度极高而不便拆卸，又因材料热处理后硬度很高，用锉刀、油石修磨都无济于事。后来采用电解擦削精修，工作约 4 h，修复后该设备又正常投入使用。

此外，电解擦削还在金属制品、模具、金属标牌上的图案文字刻印方面得到应用，它比通常电火花笔刻字、屏蔽化学腐蚀刻印的方法工艺更简单，图形文字更加清晰美观。类似地，电解擦削还可用于制作印刷电路板、在单件、小批量生产条件下其技术经济效果更佳。

随着我国科学技术的飞速发展，一些尖端科学部门和新兴工业领域的许多装备常在高温、高压以及恶劣环境中工作。因而高硬、难熔及具有特殊物理性能的材料得到广泛应用，材料愈来愈难以加工。这也将为电解擦削这一新技术提供新的应用领域。

6　微细电解加工

随着现代科学技术的发展，产品功能集成化、结构小型化的要求越来越显得重要，特别对电子、通讯、计算机、医疗、生物工程等工业产品更是如此。例如光电通信设备中激光二极管 LD 模块所需的制作非球面透镜用模具，尺寸小至 0.1～1 mm；进入人体内检查的医疗器械和管道自动检测装置等都需要微型齿轮、电机、传感器和控制电路等微型机构的应用也越来越多；微型机械的应用已逐渐取得显著的经济效益。如汽车安全气囊的传感器采用微细加工技术，把传感器和电路刻蚀在一起，使成本大为降低。微型构件的需求导致了自 70 年代以来微细加工技术、纳米制造技术的出现与发展；反之，微细加工技术的发展又促进微型机械向微机电系统（MEMS）方向发展，向人们展现出其广阔的应用和发展前景。

通常，把微型机械定义为几何尺寸在 1 mm 以下的微小机械，而把加工尺寸在 μm 级至 100 μm 级范围内的加工归属于微细加工。由于尺寸微小，其加工的尺寸精度和形状、位置精度都在约范围内，而表面粗糙度达 100 nm。还应该指出，目前许多微细加工的精度还在微米和亚微米范围内，距微细加工的要求还有一定差距。

微细加工方式包括分离（去除）加工、结合（增材）加工、变形加工三种类型。基于电化学阳极溶解的微细电解加工属于材料分离加工、即材料去除加工范畴。它以"离子"溶解方式去除材料，而金属离子的尺寸非常小，为 10^{-1} nm 级，因此电解加工在机理上较其他"微团"去除材料方式（如微细电火花、微细机械磨削）有更强的微细加工能力，在微细制造乃至纳米制造领域可能具有更大的发展及应用空间。但电解加工的散蚀问题、以及电解加工间隙中电场、流场的多变性，给提高加工精度带来一定限制，其加工的微细程度目前还不能与已经成功应用的微细加工技术相比，还只处于试验研究阶段，只局限于一些特殊的场合，如电解刻字、印花及细小孔的电解束流加工；电子工业中微小零件的电化学蚀刻加工、微型轴电解抛光等也取得了很好的效果，精度已可达微米级；此外电解与超声、电火花、机械磨削等加工方法复合的微细复合加工工艺也将显示良好的发展前景。随着研究工作的深入，对电解加工中存在的某些固有缺陷问题的解决，在提高加工精度方面关键技术的突破，微细电解加工工艺将会有其发展和应用前景。

6.1　微细电解加工的基础条件

6.1.1　微细电解加工误差的形成

微细电解加工的机理仍为电化学阳极溶解，特定的加工条件是很小的加工间隙以及电参数的选择，由此而能实现定域微量去除。以下借助于理想电解条件下电解加工平面的间隙变化的过渡过程来分析微细电解加工误差的形成。由式（4.1-48）

$$L = v_c t = (\Delta_0 - \Delta) + \Delta_b \ln\left(\frac{\Delta_b - \Delta_0}{\Delta_b - \Delta}\right)$$

可以求得工件表面上某点在对应一定进给深度 L 时的加工间隙，当加工表面有原始不平，即 Δ_0 不同，则相应表面不同点处的间隙 Δ 也不相同，这就造成加工表面不平度误差。

由于电解加工阴极无损耗，在忽略阴极制造误差条件下，对应形状误差 δ_L 为

$$\delta_L = \Delta_{max} - \Delta_{min} \tag{4.5-9}$$

式中，Δ_{max}、Δ_{min} 分别为对应进给深度 L 时，工件表面上的最大、最小电解加工间隙。这种方式在进给量足够大时，表面各点间隙趋于平衡间隙 Δ_b，此时理论加工形状误差 $\delta_L = 0$。

当加工条件为非理想状态，即考虑电解加工时机、电、液参数的变化，表面上各处平衡间隙 Δ_b 也是变动的，因此在计算表面各点对应进给深度 L 时的加工间隙，要分别以不同的 Δ_b 代入式（4.5-9）进行误差计算。

加工条件虽非理想状态，但进给量足够大，各处加工间隙趋于平衡时，由电解加工平衡间隙公式：

$$\Delta_b = \eta\omega\kappa \frac{U_R}{v}$$

两边取全微分：

$$\mathrm{d}\Delta_b = \mathrm{d}(\eta)\frac{\omega\kappa U_R}{v} + \mathrm{d}(\omega)\frac{\eta\kappa U_R}{v} + \mathrm{d}(\kappa)\frac{\eta\omega\kappa}{v} + \mathrm{d}(U_R)\frac{\eta\omega\kappa}{v} - \mathrm{d}(v)\frac{\eta\omega U_R}{v^2}$$

$$\mathrm{d}\Delta_b = \Delta_b\left(\frac{\mathrm{d}\eta}{\eta} + \frac{\mathrm{d}\omega}{\omega} + \frac{\mathrm{d}\kappa}{\kappa} + \frac{\mathrm{d}U_R}{U_R} - \frac{\mathrm{d}v}{v}\right)$$

取达到平衡时的理论加工误差 $\delta_b \approx \mathrm{d}\Delta_b$，即

$$\delta_b = \Delta_b\left(\frac{\mathrm{d}\eta}{\eta} + \frac{\mathrm{d}\omega}{\omega} + \frac{\mathrm{d}\kappa}{\kappa} + \frac{\mathrm{d}U_R}{U_R} - \frac{\mathrm{d}v}{v}\right) \tag{4.5-10}$$

由上式可知：微细加工采用小间隙 Δ_b，即用小加工电压 U_R，低电导率 κ 的电解液等参数加工时，可有效减小加工误差；另一方面稳定加工条件，减小各相关参数的变动也有利于减小加工误差。实际加工中体积电化学当量 ω 由加工材料决定，U_R、v 是设备控制精度，变动量可控制稳定，η、ω 与电解液温度、浓度及气泡率有关，且相互影响，控制较为复杂。

微细电解加工时使用钝化性好的电解液，由于存在切断间隙，可有效减小杂散腐蚀问题；采用振动进给、高频脉冲电流的电解加工可实现更小间隙的加工，如在本章第 3 节

“小间隙电解加工”中所论及的那样，保持小电解加工间隙，既可减小间隙变化量 $d\Delta_b$，也可提高加工的定域性，非常有利于提高电解加工精度。因此，实现小间隙加工的主要条件，也是实现微细电解加工的条件，而且要求更加微细，更加严格。

6.1.2 实现微细电解加工的基本技术条件

实现微细电解加工必须满足某些特定的基本技术条件。

1）微细工具阴极制造　微细加工用的细小工具阴极用普通机械加工及常用特种加工方法均难以实现，必须构思某些特殊的专用制造方法，如线电极电火花在线磨削（WEDG）方法（图 4.5-95）、在线电解反拷制造阴极的方法，都是在微细电解加工设备上在线制造微细阴极的实用方法。在线制造微细阴极非常重要，否则因二次安装阴极的误差，难以保证微细加工精度。因此需要在微细电解加工设备上设计专用的在线制造阴极的附件。

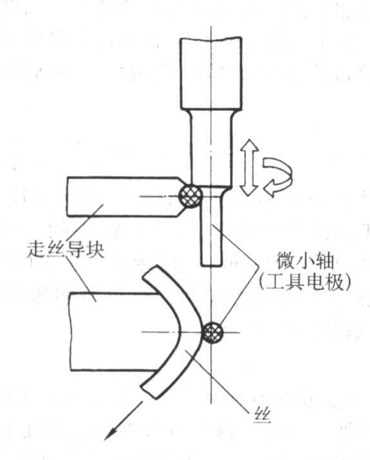


图 4.5-95　WEDG 加工系统及加工示意

2）微小位移的检测与控制　实现微细加工，必须保证精确的位置控制，则需要实现微小位移的工作机构，同时需有精密的检测措施和灵敏、可靠的控制方法。

3）实现微小加工间隙的电解参数及其控制，以保证微小去除，达到微细加工精度要求。

4）提高电解加工定域性，控制并尽量减小杂散腐蚀，提高加工精度。

近几年来的试验研究表明，高频窄脉冲电流电解加工，可望在微细电解加工中发挥重要作用。德国科学家创新研究了以纳秒计的超短脉冲电解加工技术，实现了以纳米尺度去除金属材料，加工了微型机械，精度达到几百纳米。

6.2 微细电解加工方法

6.2.1 电解蚀刻

图 4.5-96 为电解商标蚀刻，其中图 4.5-96a 为蚀刻过程示意图，可以在平面和圆柱上进行蚀刻，只要更换相应曲率半径的石墨电极头，每张镂刻有图案的丝网掩膜，可以重复印刻 1 000～10 000 次，蚀刻商标图案的深浅，可由设置的电压高低（5～36 V）和蚀刻时间的长短来调节；图 4.5-96b 为蚀刻机外形。

图 4.5-97 为电解刻印及刻字的示意图，其中图 a 为电解刻印系统图，其刻印形式如同采用丝网的印刷技术。蚀刻图案文字所必需的镂空模板采用照相制版法制成，为了控制电解液渗透同时保持所需电解的图案或字体部分，它制成网状多孔、可以透水的结构，其余部分为不透水的绝缘表面。在 5～10 V 可调电压的直流电作用下，对应渗透过电解液的模板镂空部分的工件阳极表面，产生电解刻印作用，出现黑色的字体和图案。图 4.5-97b 为电解刻字示意，字体接阴极，工件接阳极，二者大约保持 0.1 mm 的间隙，在两极间滴注少量钝化电解液，在大约 1～2 s 内完成刻字工作，目前可以在金属表面上刻出黑色印记（黑色为铁的钝化膜和炭微粒的颜色），也可以在经过发蓝处理的表面上刻出浅色的标记。

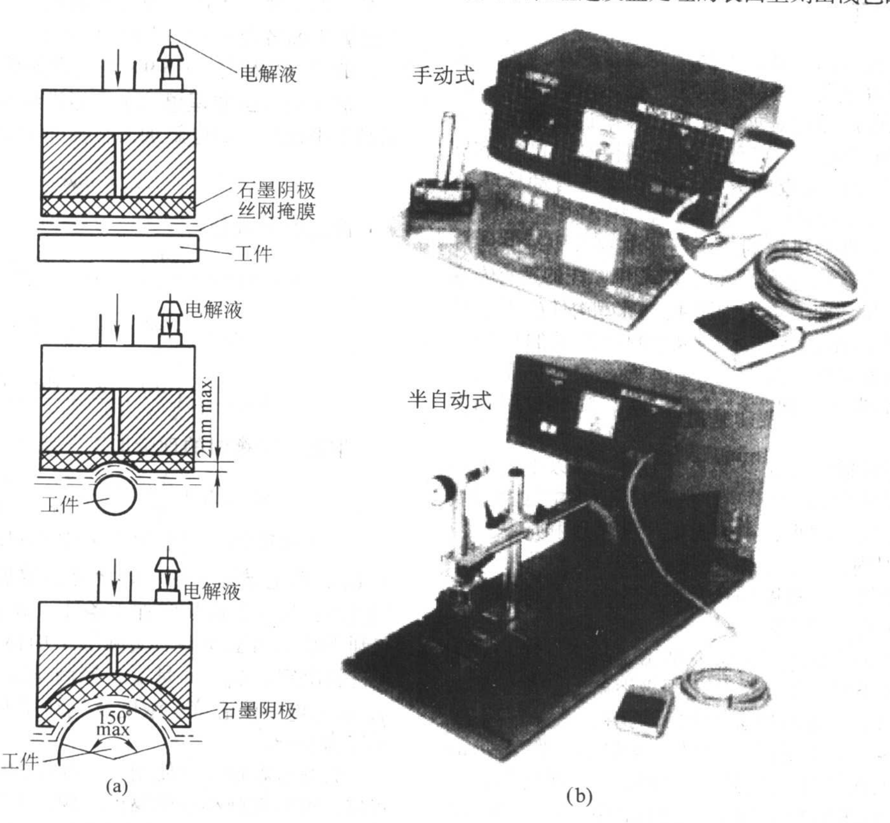


图 4.5-96　电解商标蚀刻



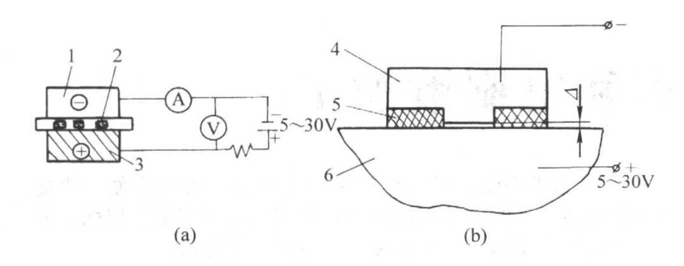


图 4.5-97　电解刻印及刻字

1—阴极；2—镂空模板；3—工件阳极；
4—字体；5—绝缘屏蔽；6—工件阳极

6.2.2　微细电解直写加工

如图 4.5-98 所示，采用具有细小尖端的微细探针，控制其和工件之间的间隙尽量小，如 1～2 μm，施加 5 V 左右的加工电压，则微细探针可以“直写”加工出所需的微细沟槽、图案或文字。为了使探针的位置正确而且尖端尽可能小，可以在该设备上采用反靠法直接制造微细探针。

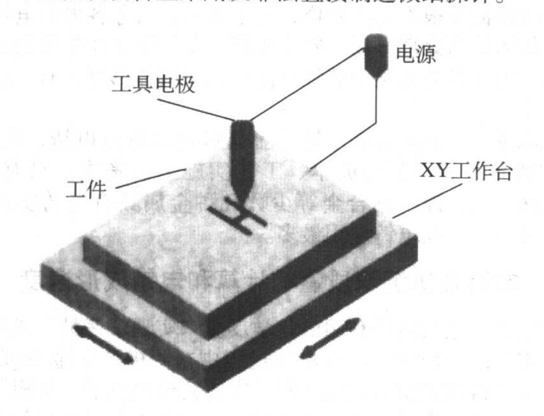


图 4.5-98　微细电解直写加工

6.2.3　微细电解抛光

由于电解抛光适用于大部分金属材料，而且抛光过程无机械作用力，可达性好，几乎可以抛光到可浸入抛光液的工件任何部位。因此，电解抛光对于改善微细零件的表面粗糙度和表面性能，能够发挥其积极作用。对于某些金属材料，抛光后表面会生成致密、牢固的氧化膜，可提高表面的耐腐蚀性能，这对于提高微细机械的表面质量很有好处。

由于抛光对象是微细零件，其电解抛光过程必然是微细、精密加工过程。因此，不同于一般电解抛光，微细电解抛光在抛光液的组成、浓度、温度，抛光参数、包括施加电压、抛光电流密度的选择，以及抛光前原始表面的清洗和活化处理，都应该特别注意按照微细、精密加工的要求，将保证表面质量和加工精度放在首位。通常，需要经过试验研究加以确定。

6.3　复合微细电解加工研究方向

微细加工去除量微小，电解作用是在微电流密度下进行，这时的杂散腐蚀、电场、流场对加工精度的影响不同于大电流密度加工时的情况，因此研究电解工艺在微细加工中的应用，首先应从“离子”去除机理研究为突破口，进一步探索以找到能进行“微小”及“定域性”、即“有选择性”去除材料的控制方法，以控制电解“微电量”方式而控制“去除量”；还可以控制加工过程，实现对工件材料按“接触式”或“近接触式”（加工间隙很小，如 μm 数量级）电解，达到无间隙或微小间隙加工的实际效果，从而彻底消除电解特有的间隙变动对加工精度的不利影响。在这方面如能有所突破，微细电解将会成为一种很有前景的微细加工新工艺。

作为寻求无间隙或微小间隙微细电解加工技术途径的探索，可以采用电解与超声、电解与电火花、电解与机械磨削相复合的方法，由电解作用产生钝化膜，让超声、电火花或机械磨削作用来去除，协调相互间的作用，近似达到了“零”间隙加工去除工件材料的效果，将可能有效地控制电解加工的杂散腐蚀，即提高电解加工的定域性，有利于提高加工精度。

此外，复合加工作用还可能使电解、电火花加工用于非金属材料的微细加工。如图 4.5-99 及图 4.5-100 所示的充气电解－电火花复合加工和超声波（充气）电解－电火花复合加工，借用辅助电极形成电场而击穿气体膜，形成电解及电火花放电通道，就能够加工非导电材料；调节施加于辅助电极的电压而控制形成电场的强度，就可以控制加工间隙；如果控制小加工间隙，也有希望对非金属材料进行微细加工。

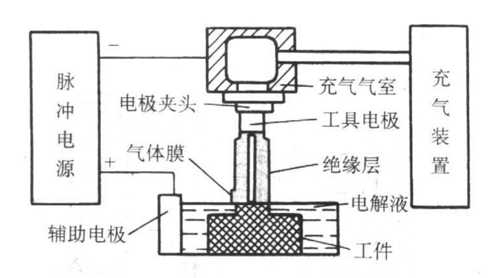


图 4.5-99　充气电解－电火花复合加工

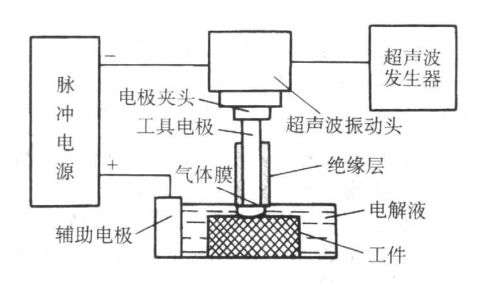


图 4.5-100　超声波（充气）电解－电火花复合加工

编写：王建业（华南理工大学）
徐家文（南京航空航天大学）
田继安（首都航天机械公司）
干为民（常州工学院）
朱永伟（扬州大学）



第6章　电铸成形和电刷镀加工

1　电铸成形加工原理

电铸属于电化学制造工艺，不过它不同于以阳极溶解去除材料而加工成形零件的电解加工，而是一种通过阴极沉积方法制取工件的特殊工艺，包括在原模（有时也称为芯模、铸模）上电沉积金属，然后将金属沉积层与原模分离从而复制零件，以及直接电铸成形整体零件的两类基本形式。

电铸和电镀的基本原理一样，但主要有两个不同的具体目的：其一，电镀主要是对基体材料加以功能防护或装饰美化，电镀层的厚度通常在几微米到几十微米之间；电铸主要目的则是获得与原模型面形状对应"相反"的金属制品，电铸层的厚度通常可达到零点几毫米到几毫米甚至更厚；其二，电镀层要求与基体材料紧密结合，牢固而难以分离，但电铸层一般最终需要与基体材料（即原模）脱离而独立作为零件使用。

1.1　加工原理

电铸加工的原理如图4.6-1所示。

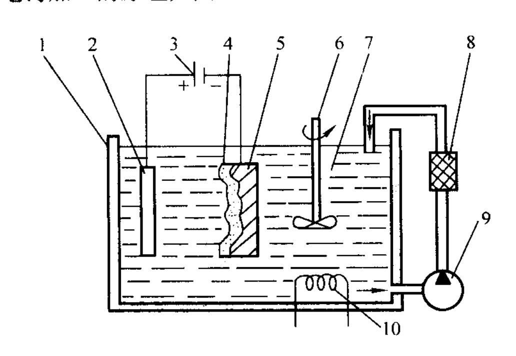


图4.6-1　电铸加工原理示意图

1—电铸槽；2—阳极；3—电源；4—沉积层（电铸制品）；5—原模；6—搅拌装置；7—电铸液；8—过滤器；9—供液泵；10—加热装置

以可导电的原模作阴极，用待电铸材料作为阳极，待电铸材料的金属盐溶液作为电铸液，均置于电铸槽内，由电源提供能源，组成电化学反应体系。当回路接通后，发生电化学反应，阳极上的金属原子失去电子成为离子进入电铸溶液，继而运动到阴极获得电子成为金属原子沉积在原模表面，阳极金属源源不断溶解成为离子，补充进入电铸溶液，使槽中的电铸液浓度大致保持不变，原模上的金属沉积层逐渐增厚，达到预定厚度时随即切断电源，将原模从溶液中取出，再将沉积层与原模分离，就得到与原模型面精确吻合但凹凸相反的电铸件制品。

金属离子的阴极还原过程一般具有以下几个步骤：

1）水化离子由电铸反应槽远处向阴极（原模）迁移；

2）水化膜变形，并被吸附和迁移到阴极（原模）表面的活化部分；

3）金属离子得到电子，成为金属原子；

4）金属原子排列成一定晶格的晶体。

电铸具有如下优点：

1）具有超高精度的复制能力，能够准确、精密地复制复杂型面和细微纹路，这是其他加工工艺难以比拟的；

2）能够获得的尺寸精度非常高、表面粗糙度 $R_a \leqslant$ 0.1 μm的复制品，由同一原模生产的电铸制品一致性好；

3）借助石膏、蜡、环氧树脂等材料，可以方便、快捷地把复杂零件的内外表面复制变换成对应的"反"型面，便于电铸工艺实施，大大拓展了电铸的适用范围；

4）容易得到由不同材料组成的多层、镶嵌、中空等结构的制品；

5）能够在一定范围调节沉积金属的物理性质。可以通过改变电铸条件、电铸液组分的方法来调节沉积金属的硬度、韧性和拉伸强度等，还可以采用多层电铸、合金电铸、复合电铸等方法得到其他方法难以获得的物理性质；

6）可以用电铸方法连接某些难以焊接的特殊材料。

目前，电铸工艺存在的主要不足之处是电铸速度低、成形时间长；此外，当参数控制不当时，某些金属电铸层的内应力有可能使制品在电铸过程中途或者在与原模分离时变形、破损甚至根本无法脱模；对于形状、尺寸各异的电铸对象，如何恰当处理电场，安排流场，得到厚度比较均匀的沉积层，需要具有经验和熟练技能的人员具体处理，有一定操作难度。

原则上，凡是能够电镀的金属都可以进行电铸，但是，综合制品性能、制造成本、工艺实施全面考虑，只有铜、镍、铁、金、镍-钴合金等少数几种金属具有电铸实用价值，又以铜、镍电铸应用最多。

1.2　电铸金属沉积质量的计算和电铸成形速度

电铸工艺实质是利用电化学反应来实现"拷贝"或直接加工零件的一种手段，在电铸过程中，阴极产生金属沉积，以此来获得所需制品。鉴于制品实体完全由离子"堆积"而成，因此用以衡量电铸工艺指标之一的加工成形速度与金属沉积质量密切相关。

1.2.1　电铸金属质量的计算

电铸属于电化学反应，遵守法拉第电解定律。当电流通过电铸槽时，阳极发生氧化反应，金属溶解；阴极发生还原反应，金属沉积；无论溶解或析出沉积物质的质量都可以通过法拉第定律及其变换式计算。电铸制品出自阴极还原反应，沉积金属的质量可按式（4.6-1）计算。

$$m = kIt \tag{4.6-1}$$

式中，m 为阴极上析出物质的质量，g；k 为电铸金属的质量电化当量，g/（A·h）；I 为电铸电流，A；t 为电铸时间，h。

电铸时，通过阴极的电量为

$$It = i_c St \tag{4.6-2}$$

式中，i_c 为阴极电流密度（取平均值），A/dm²；S 为阴极沉积面积，dm²。

当不考虑电流效率，即假定通过阴极的电流全部用于沉积金属时，可以计算出电铸沉积金属质量为

$$m = ki_c St \tag{4.6-3}$$

实际上，除了采用酸性硫酸铜溶液电铸铜时电流效率接近100%的理想状态外，多数情况下，电铸过程通过阴极的电流都不会完全用于沉积金属，部分电量消耗在副反应中。副反应主要有以下几种可能的形式：

1）水溶液中氢离子在阴极上还原为氢气：

$$2H^+ + 2e = H_2 \uparrow$$

2）某些高价金属离子还原为低价离子；

3）某些添加剂或杂质在阴极上还原，或者非所需电铸的金属离子还原共沉积。

其中，以氢离子的还原为主要副反应，这就是常见的伴生析氢，是电铸沉积层产生气孔等疵病的主要原因。

副反应消耗了部分电量，所以电铸中也提出了电流效率的概念，自然，此处更关注的是阴极电流效率 η_c：

$$\eta_c = \frac{\text{通过一定电量所沉积金属的实际质量}}{\text{通过一定电量应沉积金属的理论计算质量}} \times 100\% \tag{4.6-4}$$

或者表达为

$$\eta_c = \frac{\text{根据沉积金属实际质量计算应消耗的电量}}{\text{实际通过阴极的总电量}} \times 100\% \tag{4.6-5}$$

考虑到电流效率，即通过阴极的电流只有部分用于沉积金属时，电铸沉积金属的质量为

$$m = \eta_c k i_c S t \tag{4.6-6}$$

1.2.2　电铸成形速度

理论上，电铸成形速度很容易计算。

不考虑阴极电流效率时，设沉积金属的质量为

$$m = S\delta_1\rho \tag{4.6-7}$$

式中，δ_1 为阴极金属沉积层的平均厚度，mm；ρ 为阴极沉积金属的密度，g/cm^3。

一般，电铸工艺中 δ_1 常以 mm 为计量单位，S 常以 dm^2 为计量单位，d 常以 g/cm^3 为计量单位，若以单位时间内所获得的电铸层平均厚度表示为电铸速度 v_{dz}，则

$$v_{dz} = \frac{k}{10 \times \rho} i_c \tag{4.6-8}$$

电铸速度 v_{dz} 的单位通常为 mm/h。

当考虑阴极电流效率时，电铸速度表达式变化为

$$v_{dz} = \frac{k}{10 \times \rho} i_c \eta_c \tag{4.6-9}$$

式（4.6-9）得出的电铸成形速度是依据阴极平均电流密度 i_c 计算而来的，实际上，电铸应用对象的形状、尺寸各异，原模的结构设计以及具体工艺类型也有很多变化，电铸过程进行之中，阴极与阳极间隙间电场多半是呈不均匀分布的。原模最典型的有如尖角、棱边等外凸部位，电力线相对集中密布，局部电流密度就大，对应处沉积速度会高于平均成形速度的计算值；而原模低凹部位受到周边部位的屏蔽作用，电力线相对稀疏，局部电流密度就小，对应处沉积速度会低于平均成形速度的计算值。由于电铸工艺一般需要连续进行很长时间，这种因原模几何形状引起电场不均匀继而造成各处电流密度不均匀的情况将愈来愈加剧，局部沉积速度的差异愈来愈大，所导致的结果就是电铸制品的厚薄不均匀；最严重时，甚至可能某些部位无法正常沉积，或者因内应力不均而造成制品脱模时产生变形或破损。

所以，只有在某些电铸工艺类型中，能够按照式（4.6-9）计算电铸成形速度，并估算获得预定沉积层厚度所需的时间；此时制品各处金属大致均匀沉积，厚度近似相等，适用于如唱片模、激光全息防伪商标印制模以及牌匾、徽章、网状零件等较为平坦的对象，或者制品可以变换为二维方式沉积、回转方式均匀沉积等类型。

对于具有显著三维形状特征的电铸制品，在未采取均匀化电场等特殊措施的情况下，各处局部厚度一般很不均衡，甚至有相当大的差异。这种情况下，按照式（4.6-9）计算电铸成形速度就缺乏实用意义了。

1.3　电场、流场设计

电铸工艺是一种依靠电化学反应实现的增材制造方法，金属离子在阴极还原沉积而得到制品。阴阳极之间存在一定间隙，间隙中充满电铸溶液。溶液的作用是：1）作为导电介质，连接反应回路，传递电流；2）在电场作用下进行电化学反应，使得阴极上有控制地析出金属；3）及时排除阴极副反应析出的氢气等产物，将电流通过形成的焦耳热量带走。

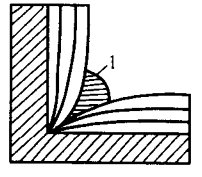
电铸的最终目的是获取符合形状、尺寸要求的制品，原模的设计、制作必须完全满足这一目的，即原模具有与制品相对应的形状、尺寸，不得随意变更。一般，电铸阳极多采用板状、带状或球体状原材按需要与阳极相向放置。阴阳极之间的间隙里充满电铸溶液，当外加电场后，极间电力线的分布首先取决于阴阳极的几何形状及相互位置，其次受电铸溶液基本特性的影响。各处电力线的疏密决定了其电流密度的差异，也就决定了局部金属沉积速度的不同，最终反映宏观工艺结果就是制品各处金属沉积层的厚度不均。

所以，电铸工艺实施的重要条件就是恰当安排电场，合理处理流场。

1.3.1　电铸中的电场及其设计

（1）电场与原模设计

原模设计应该避免出现锐角、尖棱和深槽，这是因为在电沉积过程中，沉积的金属在阴极表面一般都不会均匀分布，在锐角和尖棱部位存在“边缘效应”，电力线集中，常会形成树枝状金属结瘤；而在凹陷处则相反，受周边部位屏蔽电力线的影响，沉积层非常单薄。而原模凹陷处沉积的恰恰对应是制品的角部、棱边等边缘部分，若因为沉积层结构薄弱，在脱模力的作用下非常容易被损坏，见图 4.6-2a 所示。



(a) 原模凹槽处尖角，形成树枝状结晶　(b) 原模凹槽处圆弧过渡，电铸层均匀

图 4.6-2　凹槽处电铸沉积状况

为了预防制品角部薄弱，在允许的前提下，该部位原模轮廓应该适当加工出过渡圆弧（图 4.6-2b），最小半径应大于被加工零件的壁厚。有时，也可以在凹槽部位预先嵌入镶块（图 4.6-2a 中 1 所指），最终将镶块与沉积层结合为一体。目前，另一种可以采纳的新技术措施是用喷射电铸方式有选择地先对该部位集中沉积金属，将凹陷处“填平”到一定程度，然后再以通常方式继续电铸，直至获得整个合格制品。上述各种措施的实质，都是力图改善局部电场分布，尽可能使得沉积过程在电场比较均匀的条件下进行。

出于相同的理由，原模外部尖角处也必须加工出最小半径大于 1 mm 的圆弧，以防止形成树枝状金属结瘤。

当电铸制品形状十分复杂，几何要素很难完全适应理想电场安排，单单考虑改变原模结构已经不能适合电铸工艺的需求，此时可采用部分不导电的屏蔽部件置于阴极外某一恰当位置，或者在合适的位置增设辅助阳极（多为不溶性阳极）。前者的作用在于屏蔽部分电力线，尽量降低电流集中造成的过分沉积作用，甚至完全避免在指定区域产生沉积效应；后者则改变固有电场位置，调节电力线分布，使得各处电流密度比较均匀。

电铸对象的种类繁多，形状、尺寸千变万化，用调整电铸槽内阴阳极的几何因素来调节和改善电场分布，是不得已的办法，它操作麻烦，浪费材料，额外消耗能量，而且很大程度上依赖操作者的丰富经验，所以，往往仅限于在经过试验的某些已经比较成熟的场合才采用这种办法。

(2) 电场与电铸溶液特性的关系

在电镀工艺中，为了评定电镀液给出的镀层厚度的均匀性，提出了"分散能力"概念。所谓分散能力，就是电镀液所具有的使镀件表面镀层厚度均匀分布的能力。分散能力愈好，则制品不同部位所沉积的镀层厚度就愈均匀，反之，则镀层厚度差愈大。分散能力的实质其实就是电镀液特性对阴极上电流分布影响差异的一种评价。

另外，电镀还常提到深镀能力，即电镀液具有的使镀件深凹处沉积金属镀层的能力。分散能力是指金属在阴极表面分布均匀程度的问题，整个制品表面都有镀层，而深镀能力只是指制品深凹处是否能有金属沉积。可以看出，二者是有区别的：分散能力好的电镀液，深镀能力一般也很好，但深镀能力好的电镀液，分散能力却不一定好。

衡量电铸制品质量的重要内容之一就是电铸层厚度的均匀程度，所以，在实施电铸工艺时，更应该对电铸溶液的分散能力加以注意，用以提高电铸工艺效果。

影响电铸电流在阴极上分布的因素不少，如电铸溶液浓度、添加剂、pH值、温度、电流密度、阳极、原模和电铸槽的形状以及相互位置排布关系等等。

假如把阴极原模上与阳极距离最大处称为阴极远点，阴极原模上与阳极距离最短处称为阴极近点，在不考虑电极极化的前提下，近点处的电流密度必然大于远点处的电流密度，二者相距越远，电流密度差值就越大，金属沉积速度也越悬殊，随着时间延续，沉积层厚度必定会出现很大的差别。上述电流分布称为"一次（或初次）电流分布"。

有一些电铸溶液，导电性很好，但反应时阴极极化很大，对电流在阴极上的分布起到了均匀化的作用。考虑了极化影响后的电流分布称为"二次电流分布"，或者叫作实际电流分布，显然，这时电流实际分布要比初次分布更为均匀。在生产中，要善于利用和调节电铸溶液，提高其分散能力以满足需要。

不过，阴极电沉积过程中，原模上金属沉积量的多少，不仅和电流分布有关，还必须同时考虑电流效率，电流效率又和电流密度关系密不可分。

在常用的电铸溶液里，电流效率随电流密度变化的规律可以分为三类，见图4.6-3所示。图中曲线1表示在所使用的电流密度范围内，电流效率基本不变，可视为常数，如电铸铜常用的酸性$CuSO_4$溶液，沉积金属量直接取决于局部电流密度的大小。曲线2表示电流效率随电流密度升高而下降，大大改善了分散能力，如电铸铜可以采用的焦磷酸盐溶液，金属沉积比较均匀。曲线3表示电流效率随电流密度升高而增加，恶化了分散能力，对金属均匀沉积非常不利，应该尽量避免选用。

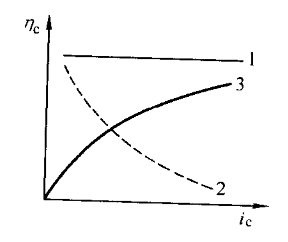


图4.6-3 电流效率随电流密度的变化

生产中，改善电铸溶液分散能力可以采取以下措施：

1) 加入电导率高的强电解质，如在$CuSO_4$溶液内添加H_2SO_4用于铜电铸；

2) 加入添加剂，如在铸镍溶液中添加无机金属盐或某些有机化合物；

3) 添加络合物，如焦磷酸盐络合物、柠檬酸盐络合物等。

综上所述，讨论原模表面沉积金属的分布时，除了研究电铸槽的几何形状、阴阳极的形状和尺寸、阴阳极在电铸槽内的排布形式等几何因素之外，还需要全面考虑影响溶液分散能力的电导率、极化度、电流效率随电流密度的变化这样三个电化学要素。这些几何要素和电化学要素最终影响着电铸槽内的电场分布，从而决定了能否获得合格的电铸制品。

1.3.2 电铸中的流场及其设计

(1) 电铸流场参数

电铸溶液在具有前述三个基本作用以外，对电铸工艺结果的优劣也有着关键性的影响，除了其成分、浓度、温度、pH值等参数外，流场参数的合理安排及具体设计也是非常重要的。

流场参数包括：

1) 溶液流动形式的选择；

2) 阴极表面溶液流速的确定；

3) 实现该流场所需供液循环系统入口压力、流量的估算；

4) 溶液过滤装置参数选择；

5) 溶液温度恒定控制装置的控制范围及控制精度等。

在大部分电铸工艺中，供阴阳极间发生电化学反应的电铸槽处于大气常压下，所以重点应该放在直接影响电铸结果的前两项流场参数的确定上。

(2) 电铸中的电流密度、电流效率与流场的关系

从图4.6-3分析，倘若只顾及分散能力，那么希望电铸溶液具有如曲线1、2所示的电流效率特性为好。然而，假如为了加快沉积速度、提高生产率，不断增加电流密度的话，将超过允许的阴极电流密度规范，电流效率反而会随之下降。严重时，阴极副反应大量析氢，将得不到良好质量的电铸层。

当阴极电流效率降低时，氢气的大量析出会带来的危害如下。

1) 造成"氢脆"。氢原子很容易渗入原模或沉积层，沉积的金属晶格发生扭曲，产生很大的内应力，这是电铸制品最要控制也较难控制的工艺指标之一。应力集中将导致制品力学性能下降，后患无穷。

2) 形成针孔和麻点。这是氢气泡在阴极表面滞留的结果，破坏了原本平滑光整的制品表面，削弱了制品强度。例如电铸模具型腔，针孔和麻点使得模具制造的修磨抛光工时增加，降低了本来十分理想的型面成形精度，如果针孔和麻点去除不够彻底，使用中还可能造成脱模困难等弊病。

3) 造成局部沉积层"烧焦"。由于边缘效应，原模的周边电流密度较其他部位要高很多，电流效率特别低，析氢相当严重，该部位附近溶液的OH^-离子浓度相应增加，pH值升高，引起金属氧化物和氢氧化物在阴极表面与金属离子共沉积，形成疏松多孔的沉积层，即发生俗称的"烧焦"现象，这同样是不允许的。

此外，过高的阴极电流密度提供给电结晶的能量较高，一方面晶核容易生成，另一方面这时晶核成长方向已不再限于平行于原模表面，同时也会在垂直于表面的方向甚至在三维空间成长，将成为不符合质量要求的粗糙或树枝状沉积层。

为了从根本上解决提高电流密度又不致过多降低电流效率的问题，追求较高生产率，必须分析其缘由以及解决途径：电铸沉积层的形成，包括物质迁移、电荷迁移、晶格化三个主要过程，其中物质迁移决定了整个电极反应速度，也就是金属离子向阴极表面传质速度决定了电沉积速度。

在电铸技术发展的历程里，采用了一些有效提高传质速



度的工艺措施。如，提高溶液温度；选用高浓度电铸液；强烈搅拌溶液以增加阴极表面溶液切向流速；缩小阴阳极间距等等。其中，合理安排电铸流场，提高阴极表面局部流速成为重要关键措施之一。

（3）电铸的流场安排

理想的电铸流场是，能够向阴极连续稳定供给维持待铸金属离子浓度的溶液，溶液在阴极表面全部待沉积区域均具有一定相对流速、不存在死水、涡流。

增加阴极表面切向流速的常用具体方法如下：

1）应用机械装置或者压缩空气强烈搅拌电铸溶液；

2）阴极作直线往复移动或高速转动（还可以周期变换旋转方向）；

3）阴极作一定频率的振动（机械方式或者电磁激励）或者将超声振动源置于电铸槽内；

4）采取喷射供液直接冲刷阴极表面；

5）将阴阳极放置在专门的工装内，迫使溶液以高速在阴阳极间隙内流动并保持紊流状态。

有资料介绍，设计专门的工装，使电铸液以一定的速度流过电铸阴阳极之间的间隙，并使液流大致保持在紊流状态，能显著提高溶液对阴极的冲刷作用。此时，既可以达到比较高的电流密度、氢气泡也容易由溶液带走，很难在阴极表面残留，这对于提高电铸质量和速度都有较好的效果。实现电铸液流动紊流状态的临界流速计算，可参照第2章第3节中3.2电解液流速和进口压力的计算方法，不再赘述。一般电铸阴阳极间隙大致为1~5 mm，则溶液流速大致超过2~3 m/s就可能实现紊流状态。

2 电铸工艺

2.1 电铸工艺条件和工艺参数及其对电铸速度、质量的影响

2.1.1 电铸镍

电铸镍具有较高的强度和硬度，抗蚀性良好，常作为结构件在模具、零件制造中使用。电铸镍常用硫酸盐、氨基磺酸盐和高速电铸专用电铸液。具体工艺条件如下。

（1）硫酸盐溶液

1）工艺规范

$NiSO_4 \cdot 7H_2O$	225~300 g/L
$NiCl_2 \cdot 6H_2O$	37~52 g/L
H_3BO_3	30~45 g/L
pH值	3.0~4.2
温度	45~65℃
电流密度	3~10 A/dm^2
搅拌方式	空气或机械搅拌

2）沉积层性能

抗拉强度 σ_b	345~485 MPa
伸长率 δ	15~25%
硬度	130~200 HV

3）特点　溶液易维护，成本低。沉积层强度较低，塑性好，内应力中等，易产生结瘤与麻坑。

（2）氨基磺酸镍盐溶液

1）工艺规范

$Ni(NH_4SO_3)_2 \cdot 4H_2O$	300~450 g/L
$NiCl_2 \cdot 6H_2O$	5~25 g/L
H_3BO_3	30~45 g/L
pH值	3.0~4.5
温度	30~60℃
电流密度	3~10 A/dm^2
搅拌方式	空气或机械搅拌

2）沉积层性能

抗拉强度 σ_b	415~620 MPa
伸长率 δ	10%~25%
硬度	170~230 HV

3）特点　成本较高，溶液温度高于70℃、pH值<3时会水解。阳极钝化时，会使氨基磺酸镍分解，使铸层中含有硫。沉积速度较快，强度高、内应力小。易产生结瘤与麻坑。

（3）工艺规范对电铸镍层性能的影响

使用硫酸镍盐时，随着溶液温度升高，δ、硬度增大，σ_b、内应力没有变化；随着电流密度增大，σ_b、内应力升高，δ、硬度则没有变化；pH值的变化不影响σ_b、δ、硬度和内应力。

使用氨基磺酸镍盐时，随着溶液温度升高，σ_b、δ降低，硬度、内应力增大；随着电流密度增大，δ、硬度、内应力升高，σ_b降低；随着pH上升，δ降低，σ_b、硬度增大，内应力在pH值为4.1~4.2时最小。

2.1.2 电铸铜

电铸铜的导电性好，导热性高，但是强度和耐磨性都比较差，故不适合作受力的结构件，主要用于要求不受力的场合，如电火花加工电极等。电铸铜是电铸行业中除镍外应用最广泛的铸种。电铸铜通常采用硫酸盐电解液。具体工艺条件如下。

（1）工艺规范

$CuSO_4 \cdot 5H_2O$	210~240 g/L
H_2SO_4	50~70 g/L
温度	20~50℃
电流密度	1~10 A/dm^2
阳极	电解铜
搅拌方式	空气或机械搅拌

（2）沉积层性能

抗拉强度 σ_b	205~380 MPa
伸长率 δ	15~25%
硬度	45~70 HV

（3）工艺规范对电铸铜层性能的影响

随着溶液温度升高，σ_b、δ、硬度降低，内应力增大；随着电流密度增大，σ_b、内应力升高，δ降低，硬度则没有变化。

2.2 提高电铸速度、改进电铸质量的措施

尽管电铸具有复制精度高的特殊优点，但是生产效率低下是其致命弱点，很大程度上限制了它在工程中的应用。因此，提高电铸生产率，即提高电铸速度是一个重要的研究课题。目前，在各国研究人员的共同努力下，已开发了多种高速电铸工艺。

要实现高速电铸，必须先分析常规电铸中限制沉积速度的主要因素。

如前所述，电铸过程，即阴极过程由以下步骤组成：

1）电铸液中的金属离子到达阴极表面——物质迁移；

2）离子在阴极表面与电子结合，成为金属原子；

3）金属原子在电极表面扩散到达晶格位置；

4）参与晶格组织。

通常在电铸中，第一步总是最慢，成为提高沉积速度的瓶颈。所以要提高沉积速度，就要想方设法加快第一步进程。以下，将对提高电铸速度、改进电铸质量的主要措施进行介绍。

2.2.1 强制电铸液快速流动

该方法是使电铸溶液在阴极表面快速流动，从而达到加

快金属离子迁移、补充，提高电铸速度的目的。

(1) 平行液流法

使电铸溶液在阴阳极之间作高速流动，液流方向平行于工件表面，能产生很大的切向流速。

通常，循环补充的电铸溶液流量都不算太大，为了保证足够的极间流速，这时阴阳极间的距离应比常用值设置要窄，一般在 1 ~ 5 mm 左右。在这样的间隙条件下，比较容易实现电铸溶液流速大于 2 ~ 3 m/s，使间隙中溶液处于紊流状态。此方法的原理如图 4.6-4。

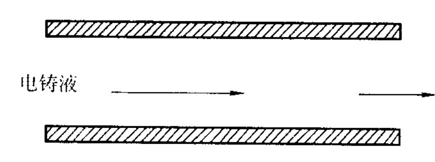


图 4.6-4　平行液流法流场示意

平行液流法能在较低的槽电压下增大离子电迁移速度，因而也可减小溶液欧姆压降损耗，所以还节约了电能。

从 20 世纪 80 年代起，美国、日本开始采用此项技术在带钢上电沉积锌，较普通电铸生产效率提高 3 ~ 4 倍。

(2) 喷射液流法

电铸溶液从特制的喷嘴中喷向作为阴极的工件。喷嘴自身应具有不溶性，阳极设在喷嘴内部，喷射出的溶液射向阴极后经接收集存于槽中，再经泵循环输送至喷嘴，其间可增设连续过滤装置。可以调节供液泵出口压力来控制电铸溶液流量，保证喷射溶液在沉积区具有相当高的局部流速。见图 4.6-5 所示。

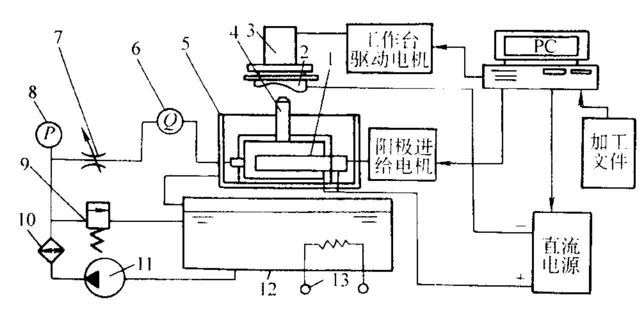


图 4.6-5　喷射电铸示意

1—阳极；2—原模；3—运动机构；4—喷嘴；5—集液槽；6—流量计；7—截流阀；8—压力表；9—溢流阀；10—过滤器；11—循环泵；12—储液槽；13—加热器

喷射供液电铸能够在很小的阴极区域达到较高的沉积电流密度，局部沉积速度较高。所以喷射供液适用于局部区域电铸或小型零件制造，在某些场合，还要求喷嘴与工件相对移动，以实现对沉积区域的选择。

为了充分发挥喷射电铸的优点，喷射流截面积必须很小，而沉积电流是通过溶液传递的，造成此处的欧姆损耗较大，因此需要采用比常规电铸更高的槽电压。

由于存在边缘效应，应用喷射供液电铸法必须试验金属沉积层厚度分布是否均匀。

2.2.2　阴极（原模）高速运动

1) 阴极旋转法　通过实现阴极的高速旋转，可以提高原模与溶液介面的相对速度，降低扩散层厚度，从而提高允许的极限电流密度，加快沉积作用。一般来讲，阴极转速越高，金属离子迁移速度就越快。通常，阴极转速应大于 6 000 r/min。这种阴极运动方式常用于回转体工件的电铸。

2) 阴极振动法　阴极振动法是通过一定的机械装置，让阴极在电解液中产生振动。其振幅范围为数毫米至数十毫米，振动频率范围为数赫兹至数百赫兹，振动方向应垂直于零件主沉积表面。对于形状比较复杂的电铸对象，这是一种适用面较广，具有较好应用前景的方法。

除了在实验室应用超声波振动辅助电沉积的试验之外，比较适用的阴极振动形式是机械振动和电磁振动。阴极机械振动，就是使用变速电机带动偏心轮，再通过连杆机构将转动转换为平动，阴极与连杆连接，改变电机转速或偏心轮的偏心距，即可调节阴极振动频率和振幅。阴极电磁振动，则是直接使用电磁振动器来实现阴极振动，但是振幅有限，一般最大只能达到 2 mm 左右。

2.2.3　摩擦阴极表面法

在电铸过程中使用固体绝缘颗粒连续或间歇摩擦阴极表面，也能减小或消除扩散层，使阴极表面迅速得以补充金属离子，从而提高沉积速度。同时，这一方法还能增强阴极活化，改善整平作用，消除结瘤及树枝状沉积层。最常用的摩擦阴极表面法是美国 Norton 公司发明的 NET 法，主要分为两种。

1) NET – Ⅰ 法是在玻璃丝或尼龙等制成的“无纺布”上镶嵌粒度为 1 ~ 5 μm 大小的碳化硅（SiC）磨料，布是多孔的，很容易充分浸透电铸溶液。用这种镶有硬粒子的“布”在阴极表面进行摩擦，电铸液透过孔到达阴极表面连通反应回路。这种方法广泛适用于平板、线材、棒料、筒状等类型工件的电铸，最高沉积速度可达 75 μm/min。原理如图 4.6-6 所示。

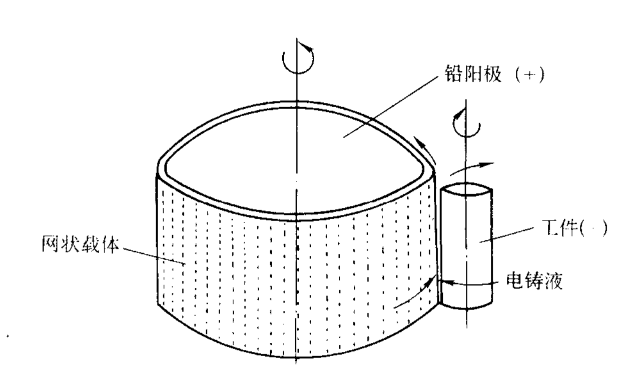


图 4.6-6　NET – 1 法原理示意

(2) NET – Ⅱ 是将如玻璃球、氧化硅、氧化铝、陶瓷等制成的微小绝缘硬粒子放入电铸槽中，再加入一定量的电铸溶液，通过阴极自身旋转和沉积槽的振动，使绝缘粒子既作振动又作运动，不断撞击、摩擦阴极表面，从而实现消除扩散层，达到高速电沉积的目的。原理如图 4.6-7 所示。

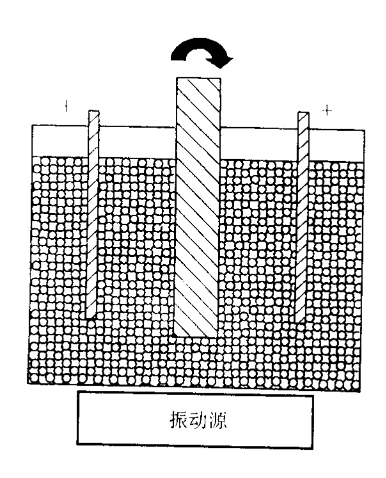


图 4.6-7　NET – Ⅱ 法原理示意



这种方法得到的沉积层很均匀，虽然沉积速度低于 NET-1 法，但是“深镀能力”相当理想，对制造有特殊要求的工件颇有意义。

NET 法允许的最大电流密度如表 4.6-1 所列。

表 4.6-1 NET 法允许的最大电流密度

沉积金属	最大电流密度 /A·dm^{-2}	沉积金属	最大电流密度 /A·dm^{-2}
Cu（硫酸型）	495	Ni（瓦特盐）	216
Cu（焦磷酸型）	1 165	Ni（氨基磺酸型）	540

2.2.4 脉冲电铸

在现代电镀工业中，已经较为普遍地采用了周期换向电源，并且逐渐扩大到应用脉冲电源，对于改善沉积层质量起到了显著作用。目前，在电铸工艺中，也借鉴了间歇电镀应用的先进技术，脉冲电铸就是关键技术之一。

与直流电铸相比，脉冲电铸增加了对电流波形、频率、通断比以及平均电流密度等参数的调节及配合，使得电沉积过程能够在很宽的范围内变化，更有利于选择加工参数，优化沉积过程，获得预期的制品。

（1）脉冲电铸的主要优点

1）能改变沉积层的组织结构，使得沉积的金属结晶致密；

2）改善分散能力；

3）显著降低沉积层的孔隙率，提高制品抗蚀性；

4）降低沉积层的内应力。

（2）脉冲电铸可供选择调整的电参数

1）波形 脉冲电源可以具备矩形波、三角波、前锯齿波或后锯齿波、正弦波等最常用的波形。使用得最多的是矩形波。

2）频率 f 脉冲电源可供调整的频率范围在几十到几千赫兹之间，经常选用的频率在几百到一、两千赫兹左右。

3）通断比 α 电流导通与断开的时间之比称为通断比 α [见式（4.6-11）]，可以在零点几到几十之间选择。

4）平均电流密度 $\bar{i}$ 脉冲电铸可以用导通时间 T_{on}、断开时间 T_{off}、峰值电流 $\hat{I}$（或者峰值电流密度 $\hat{i}$）作为调节的电参数，其间的关系可以按照下面的公式计算。

$$f = \frac{1\,000}{T_{on} + T_{off}} \tag{4.6-10}$$

$$\alpha = \frac{T_{on}}{T_{off}} \tag{4.6-11}$$

$$\bar{I} = \hat{I}\,\frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}} \tag{4.6-12}$$

式中，f 为脉冲频率，Hz；T_{on} 为导通时间，ms；T_{off} 为断开时间，ms；$\bar{I}$ 为平均电流，A；$\hat{I}$ 为峰值电流，A。

已知阴极面积后，根据电流值就可以换算电流密度。

为了进一步提高脉冲电流电铸的工艺指标，在不同场合，还可采取变换波形、周期变更脉冲方向（即以正脉冲为主的正负脉冲交替）等措施，以解决电极介面电容充电效应的不利影响，提高阴极活化极化，削弱树枝状沉积层及结瘤等疵病的产生，改善宏观整平作用，更有利于获得结晶细密的沉积层。

3 电铸的应用和发展

3.1 电铸的典型应用

3.1.1 CD 唱片模具制造

（1）制造环节

CD 唱片生产可以简单地分为四个环节：预制原模、制作原模、电铸、复制。

将程序和数据刻录成 CD-R 盘的过程包括如下几个步骤。

1）预制 将 CD-ROM 节目的程序和数据，利用软件在硬盘上按 CD-ROM 格式模拟生成映像文件。

2）优化、测试 对程序和数据进行测试和优化。

3）刻录 将生成的映像文件利用刻录软件刻录到 CD-R 盘片上去。

任何 CD-ROM 盘的质量最高只能达到生产该盘所用原模的质量，所以制原模被认为是整个生产过程中最关键的一步。制原模所制出的 CD 凹点，是所有制造形成物中最小的——每个约为烟雾颗粒大小。

在螺旋形轨道上使感光性树脂曝光，生成光盘的具体内容。感光性树脂上曝光的部分被腐蚀掉以后，就在抗蚀性的表面上形成了上亿个微小的凹点。

经过显影之后，在感光性树脂表面蒸覆上一层金属膜（通常是银），以便电铸时有导电表面，原模即告准备完成。

（2）电铸

电铸的最终目的是生产用于复制 CD 的金属模。原模浸浴在含有镍离子的电铸溶液里，通电后，原模上的曝光区域不断沉积镍离子，镍层不断加厚，并与原模表面上的凹点和台面（凹点之间的部分）的轮廓对应精确一致。

电铸溶液配方：

氨基磺酸镍	300～400 g/L
氯化镍	10～20 g/L
硼酸	30～40 g/L
十二烷基磺酸钠	0.01～0.05 g/L
温度	30～40℃
阴极电流密度	0.5～2.0 A/dm^2

最终，形成一层厚且坚固的镍片，其表面与光盘原模型面完全对应。通过重复性电铸过程，模片的数量不断增加，每一个模片都是原模的精确复制品，将可用于复制塑料 CD 的大规模生产。

3.1.2 波导管成形

雷达产品中的波导元件品种繁多。近年来，随着产品更新，形状复杂的异型波导元件的应用越来越多，零件的尺寸精度要求越来越高，制造难度也越来越大。有些要求特殊的复杂异型波导元件，仅依靠常规电铸还不能成形。

在双极化卫星通讯地球站馈线中的关键零件——6 GHz 正交模耦合器（见图 4.6-8）的制造中，采用了预埋件和原模镶拼组装在一起后（见图 4.6-9）再通过电结合技术整体电铸成形的工艺方法，成功地制造出高精度复杂异型波导元件。

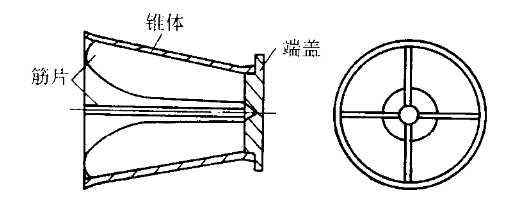
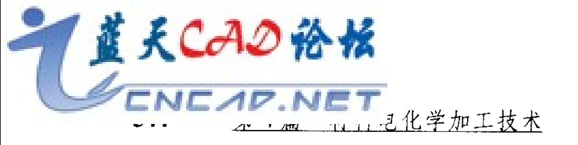


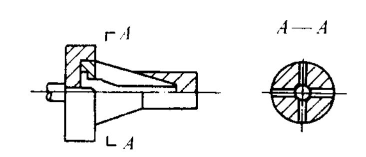
图 4.6-8 精密异型微波器件

1）微波器件的电铸工艺流程：原模、肋片制造——脱模层处理——装配原模和筋片——电沉积——精车电铸制品外表面——将电铸层和筋片的结合体与原模分离。

2）采用无添加剂的常规硫酸铜铸液，具体成分为：

$CuSO_4$	250 g/L
H_2SO_4	60 g/L





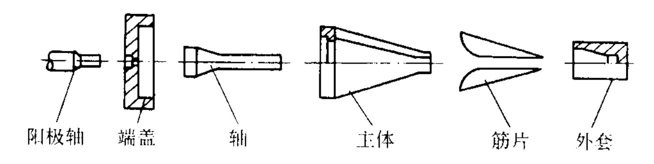


图 4.6-9　组合原模分解示意

溶液配好后最好采用 1 ~ 2 g/L 的活性炭过滤处理。电铸时溶液温度为 40℃。铜阳极装在尼龙袋内以防止铜杂质进入电铸液中。阳极与原模母线相距 100 mm 左右平行放置。

在电铸槽中，金属离子沉积在原模的外表面和筋片端部，很快形成连续的金属铸层，并且紧密、牢固地与筋片端部连接在一起，而原模锥状表面由于材料自身特性和进行过脱模层预处理，所以与铸层的结合力很小，容易脱模。

由于阴、阳极间距大致相等，因此可获得厚度较均匀的电铸层和较高的沉积速度。同时，采用了脉冲电流，脉冲宽度和脉冲间隔分别为 3 ms 和 9 ms，脉冲电流降低了浓差极化，产生更高的电化学极化，导致晶粒变得很细小，能获得更致密的金属层。

采取组合式电铸形式，避免了深槽电沉积的弊端，可获得均匀的铸层。另外，在均匀的电流分布和强烈的搅拌条件下，允许采用高电流密度提高沉积速度，实际所采用的电流密度为 40 A/dm^2，此时已经大大超过一般电铸时的电流密度。当铸层达到足够厚度时，以原模上预先加工的中心孔定位，将沉积层外表面精车到要求的尺寸和表面粗糙度，取下所得合格制品。

3.1.3　滤网制造

滤网通常用于油、燃料和空气过滤器。电铸是制造各种设备所用滤网的有效方法之一，可以加工面积大小不等、孔型各异的滤网。

某航空设备的油路系统中安置有净化油液的一种微型滤网，局部尺寸如图 4.6-10 所示。其电铸过程如下。

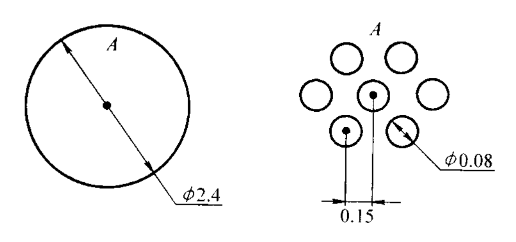


图 4.6-10　微型滤网

该滤网外形尺寸很小，在近 8 mm^2 的面积上要加工出数十个直径为 $\phi 0.08\ \mu m$ 的孔，如此小而多的群孔无论对常规工艺或特种加工来说都不是易事。采用机加工方法，由于孔径过小难以进行，也不经济；采用放电加工，则需解决微细电极的制作和装夹，若想提高效率，采用“刷子”式组合电极，则电极的制作精度与装夹定位精度很难解决；采用激光加工，孔的精度、一致性和孔口边缘的质量都不易保证。

采用电铸工艺制取微型滤网，是在具有所需图形绝缘屏蔽膜的金属基板上沉积金属，有屏蔽膜处无金属沉积，无屏蔽膜处则有金属沉积。当沉积层足够厚时，剥离金属层，获得具有所需镂空图形的金属薄板。

这一技术的工艺流程如下：

AUTOCAD 绘图——光绘透明胶片——制造阴极原模板——电沉积镍——剥离滤网。

在金属基板上形成具有所需图形的绝缘屏蔽层，需要采用照相制板方法。根据图纸尺寸和精度要求，用 AUTOCAD 等软件绘图，最好用该软件所内嵌 AUTO－LISP 语言编程绘图，以保证图形的一致性和位置精度要求。小孔用黑色填充。图形放大数十倍后再用绘图机绘出，继而缩拍成与零件相同比例的胶片。为了便于大量生产同一形状的滤网，要用制版机分步重复照相，以便把多个图形规律地密密排列在原版胶片上。

原版的制作不仅要求尺寸精度好，而且反差也都要求十分恰当。影响图像质量的一个重要原因就是原版出现针孔及黑点，这大都是由于尘埃引起的，因此必须采取严格的防尘措施。更好的方法是采用计算机——光绘机系统，在形成计算机图形后直接制作胶片，可以大大提高胶片质量。

金属基板采用不锈钢制作，其上均匀地涂上正性光致抗蚀胶，这种胶受光照射部位具有在溶剂中溶解的性质。感光胶干燥后，将其与胶版掩膜贴紧进行曝光，曝光所用光源要考虑到感光胶的感光波长范围。将感光后的基板显影、定影后，就获得了在小孔处有耐蚀膜、其他处裸露的金属基板。

入槽电铸前，将金属基板的边缘和后背进行绝缘处理。为了在电铸结束后顺利地将沉积层剥离，必须在基板上建立一层脱模层。

为了使产品具有很小的内应力，在脱离基板后不至于产生很大的变形（如打卷），采用了低应力的氨基磺酸镍电铸液，具体成分为：

氨基磺酸镍	400 g/L
氯化镍	15 g/L
硼酸	30 g/L
十二烷基磺酸钠	0.2 g/L
温度	40℃
阴极电流密度	5 A/dm^2

电铸前，用活性炭对电铸液进行净化处理，在电铸过程中循环过滤。板状镍阳极和阴极金属基板原模平行放置，相距约 8 cm 左右，电铸液在间隙中以较高的速度流过，使得电场能均匀分布，并起到搅拌、冲刷的作用，从而减小浓差极化，提高沉积速度。

达到足够沉积厚度后，将基板取出水洗、干燥，剥离金属薄片，就得到微型滤网。

3.1.4　激光防伪商标压印模型面成形

全息技术能够记录和再现物体的三维信息。20 世纪 80 年代，诞生了模压彩虹全息图，引入空间频率编码技术和加密技术后，具有良好的防伪性能，已成为当今各国公认的一种有效的防伪手段。

模压全息图的制作分为三个阶段：激光摄制原片全息图→电铸金属模板→模压复制。激光摄制原版全息图，即用光致抗蚀剂板（光刻胶版）作为记录介质摄制浮雕型白光再现全息图，这是最重要的工序之一。电铸金属模板是将光刻胶板上的浮雕全息图像转移到金属板上，以便在模压机上作为压印模板对热塑性薄膜进行大批量复制。

电铸前，首先清除光刻胶层表面的油污和杂质，以确保图像的保真度和沉积层的牢固性；然后进行敏化或活化处理，使光刻胶板的表面离子化，再进行化学镀，形成导电层；随后进行电铸，得到所需厚度的金属模板。

电铸镍的配方如下：

氨基磺酸镍	400 g/L
氯化镍	15 g/L
硼酸	30 g/L



十二烷基磺酸钠	0.2 g/L
温度	40℃
阴极电流密度	5 A/dm^2

再经过剥离、钝化和翻铸，处理到第四代才能作为模压用的金属模板。在整个电铸过程中，要不断地对电铸液进行化学分析，样品分析，调整各类药品成分，调整电流和 pH 值，以求获得具有平整度、硬度、耐久性好的模板，实现全息图的大批量生产。

3.1.5 金首饰制作

金电铸工艺是当今世界首饰制作的最新工艺技术。首饰多由贵重金属制成，在完美的艺术设计完成后，首饰的基本材质、用量和加工成本决定了其不菲的价值。与传统的黄金铸造工艺相比，用电铸技术生产黄金制品具有节省材料（质量一般为传统工艺的三分之一）、线条生动、细节分明、复制精度高等特点。自 1994 年在香港首次应用以来，至今在黄金产品制造中已占统治地位。

电铸相关过程为：制造蜡模——涂覆导电涂料——电铸黄金（或银）——去除蜡芯及导电层——表面修饰。图 4.6-11 显示了基本工艺流程。



图 4.6-11 金饰品的电铸工艺流程

一种电铸金的溶液配方如下：

亚硫酸铵	150 ~ 250 g/L
金	5 ~ 25 g/L
柠檬酸钾	80 ~ 120 g/L
pH 值	8.9 ~ 9.5
温度	45 ~ 65℃
搅拌方式	阴极运动
电流密度	0.1 ~ 0.8 A/dm^2
阳极	金

由于电铸的是贵重金属，电铸工艺宜采用脉冲电流，除了获得良好的沉积质量以外，更主要的目的是力求节省材料。

图 4.6-12 所示的是应用电铸工艺制成的金饰品。



图 4.6-12 电铸制成的金饰品

3.1.6 火箭驱动器内置冷却槽燃烧室

火箭发动机是火箭的动力装置，推力室是其产生推力的重要部件。图 4.6-13 所示为液体火箭发动机的推力室，它由头部（喷注器）、燃烧室和喷管组成，其中燃烧室和喷管是一体的。推进剂（如液氢和液氧）由喷注器喷入燃烧室，经雾化、混合、燃烧，形成 3 000 ~ 4 000℃的高温和几十兆帕的高压燃气，在喷管内迅速膨胀，以每秒几千米高速喷出而产生推力。

由于推力室的形状、结构很复杂，特别是内部设计有冷却通道，因而无法用常规工艺加工。目前，制造方法是先用锆铜合金材料制作出内壁，并在圆周上加工出截面为矩形的轴向槽，然后在内壁电铸一层金属作为外壁，留出矩形槽形成所需的冷却通道。

为保留内壁矩形槽以最终形成冷却通道，电铸前，槽内要用材料填充，蜡是最常用的填充物，因为蜡能很方便地在电铸后加热融化去除，这就要求电铸液的温度不宜过高。在电铸镍前预先电铸一薄层铜是为了提高电铸镍层与锆铜基材之间的结合力。

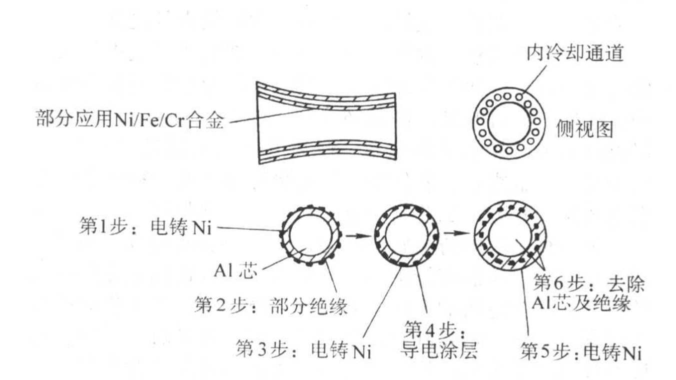


图 4.6-13 火箭发动机燃烧室及其电铸过程

由于 Ni－Mn 合金具有更高的机械性能，且可进一步提高推力室的承热能力，提高火箭发动机的性能，因此，近年来开始用镍锰合金作为推力室外壁，即以电铸镍锰合金代替电铸镍的工序。美国已经开始使用镍锰合金代替镍，我国也正积极开展这方面的研究。

1）电铸镍的溶液成分如下：

氨基磺酸镍	400 g/L
氯化镍	15 g/L
硼酸	30 g/L
十二烷基磺酸钠	0.2 g/L
温度	40℃
阴极电流密度	5 A/dm^2

2）电铸镍锰合金的溶液成份如下：

氨基磺酸镍	400 g/L
氨基磺酸锰	55 g/L
氯化镍	15 g/L
硼酸	30 g/L
十二烷基磺酸钠	0.2 g/L
温度	40℃
阴极电流密度	5 A/dm^2

电铸铜层和镍层要求杂质含量不高于规定值，抗拉强度、屈服强度和延伸率不低于规定值，电铸镍层的最大内应力也必须控制在一定范围内。

退火后，对电铸沉积表面进行后续机械加工达到最终要求的形状、尺寸和表面质量。综合检验是为了防止电铸层存

在沉积缺陷以及冷却通道出现渗漏，保证电铸层与基材之间的结合强度等。产品投产前，以与产品相同的电铸液及相同规范下对试片进行电铸和测试，目的是通过试验样片来控制正式产品上电铸层的成分和性能指标。

3.2 电铸技术的发展趋势

电铸工艺历史悠久，但早先工业应用主要局限于复制艺术品和印刷制版。随着电子、电化学、机械、材料等领域近代理论和先进技术的逐步问世，对电铸技术的再认识不断深化，推动了电铸工艺的发展。

1）扩展新型电铸材料是电铸技术目前发展的重要方向之一。这个方向取得的主要进展包括为提高沉积材料性能而开发的高强合金电铸、复合材料电铸及纳米材料电铸等。

① 在合金电铸方面，已开展了镍钴、镍铁、镍锰等二元合金电铸的研究，在许多重要场合得到了成功应用。如用镍锰合金电铸火箭发动机喷管冷却通道，具有良好的焊接性能和高温性能，具有较高的硬度及强度；电铸 Ir/Re 合金已成功用于制造火箭发动机燃烧室，较好地满足了设计要求。

② 电铸制备金属基复合材料可以提高沉积层的耐磨性、耐热性及其他某些力学性能。电铸复合材料是在电铸金属中夹杂弥散强化的粒子或纤维，使其力学性能得到提高。

电铸复合材料有两种类型，一种是在电铸溶液中加入弥散的固体微粒，使其与金属离子共沉积而形成含有固体微粒的金属层．其目的是提高电铸金属的强度、硬度和耐磨性，以提高电铸产品的使用寿命。这类电铸层主要是以镍为基，用碳化物、金刚石、氧化物、氮化物等高硬度微粒强化的复合电铸层。其电铸工艺与一般复合电铸工艺相同。

另一种是在电铸金属的同时，在原模表面缠绕高强度的纤维丝而获得镶嵌有纤维的金属电铸层，以达到强化电铸层的目的。作为电铸的金属主要是镍、铜、铝，其工艺规范与常规规范相同。增强纤维主要是硼、碳、各种玻璃纤维、陶瓷纤维和高强金属纤维。缠绕方式可以是连续缠绕或电沉积与缠绕交替进行，其强度得到大幅度提高并且符合混合强化法则。

交替电沉积两种不同金属从而形成层状材料也可以认为是电铸复合材料的一种形式。当交替电积铜与镍至总厚度 1 mm 的电铸层时，复合层的强度随复合层数的增加而升高，而其塑性并未降低。用脉冲电流交替沉积 50 nm 的铜与镍层至 0.5 mm 厚的复合层时，其强度与塑性均比纯镍层高。

③ 电铸纳米材料可以显著提高材料本身的性能，如电铸制备的纳米镍的表面微观硬度约为 600 HV，抗拉强度为 1 100 GPa，而普通电铸镍的微观硬度只为 270 HV，抗拉强度不会超过 600 MPa。

2）用电铸方法将两个零件连接起来是电铸工艺的特殊应用，也是一种特殊连接手段。以电铸连接不锈钢和铝合金为例，其工艺如图 4.6-14 所示。

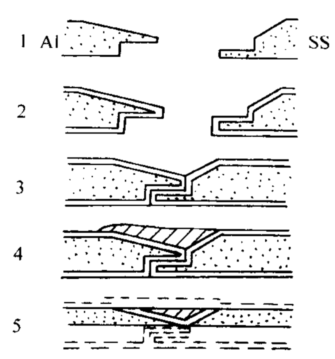


图 4.6-14 电铸连接工艺示意图

工艺流程依次为：①加工剖口；②预电铸 13 μm 的铜；③装配；④电铸镍；⑤机械加工接头。

此法曾成功地将直径约 1 m 的 6061－T6 铝合金环与 AM363 不锈钢环连接成一个整体，将接头处加工成拉伸试样进行测试表明，试样连接强度很高。还有将直径 ϕ178 mm 的 4340 钢环与 U－0.75Ti 铀合金环、直径 ϕ9.6 mm 的铍片与不锈钢壳、石英晶体谐振器与 0.05 mm 厚的不锈钢卡箍电铸连接成功的实例报道。

电铸连接的特点是，由于在常温下操作，可避免高温连接（如焊接）使零件产生很大内应力甚至变形的情况，也不会使基材性能恶化。此外，有些材料（如铍）在高温下会放出有害气体，而电铸连接可避免这种情形的发生。

原则上，凡能电镀的基材均可进行电铸连接。从电铸金属的性能和工艺上去考虑，电铸连接的金属通常选用镍。众所周知，电铸的生产周期长，电铸连接时的工艺程序也比较复杂，因此，该连接方法主要用于焊接、胶接等常规连接方法不能满足产品要求的特殊场合。

3）电铸技术在微机电系统（MEMS）制造领域的成功应用，是近年来电铸技术发展的一个最重要的成果。在这个方向，目前研究主要集中在提高沉积的均匀性方面，通过屏蔽等辅助手段，提高电场的均匀性，制备性能一致的微细零部件。

LIGA 是德文（Lithographie GaVanoformung Abformung）的缩写，即 X 射线光刻，微细电铸，微注塑，现常称为 X 射线深层刻蚀精密电铸模塑成形。LIGA 在微机电系统（MEMS）技术应用的制造环节具有很大的适用性和灵活性，发展前景非常诱人。

应用 LIGA 技术，可制造出数百微米高、1 μm 宽，形状精度达纳米级的微结构。美国 Wisconsin 大学在此基础上制造出最小外径为 ϕ27 μm、内径 ϕ8 μm、形状精度达 0.1 μm 的齿轮。采用 LIGA 技术，可以制造微传感器、微阀门、微过滤器、微射流器、微接插件、微齿轮、光纤耦合器和微型马达等各种微器件，它们在航空航天、汽车、仪器仪表制造、微电子、信息传输以及医疗和生物工程等各个领域都有广阔的应用前景。

LIGA 技术的实施过程如图 4.6-15 所示。

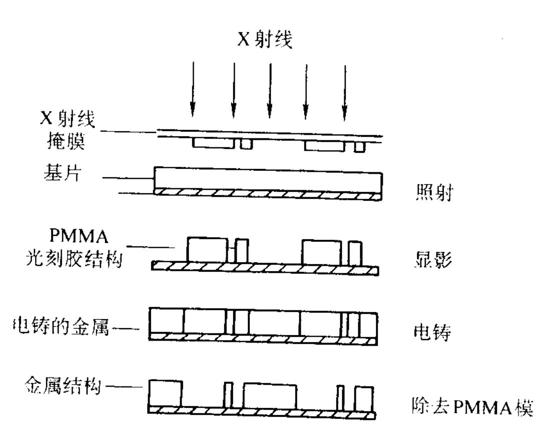


图 4.6-15 LIGA 工艺基本流程

在 LIGA 工艺中，微电铸的任务是将基板上经过显影的光刻胶空隙部位沉积上金属层，可以是镍、铜、金、铁镍合金等。由于有些 MEMS 器件具有较大的深宽比，且电铸溶液进入微小的窄缝、槽时，需要克服表面张力，对电铸溶液的成分及配套工艺都提出了新的特殊要求，这无疑将进一步推动电铸技术的进步。

4）电铸技术、快速原型制造技术相互结合、相互促进



发展。快速原型制造是20世纪80年代以来迅速发展起来的制造新技术，它的出现极大地缩短了产品研制、开发周期。近年来，快速原型制造技术也逐渐被应用于工具的快速制造，如快速制造电火花加工电极或塑料模具型腔。如果用快速原型制造技术制造电铸原模，将原模工作表面进行导电化和脱模层处理再进行电沉积，到1~2 mm左右脱模，背衬后即可用作电火花加工电极进行模具型腔的加工。利用电铸进行电火花加工铜电极的制造，可大大缩短模具的制造周期，有着良好的经济效益和社会效益。过程如图4.6-16所示。

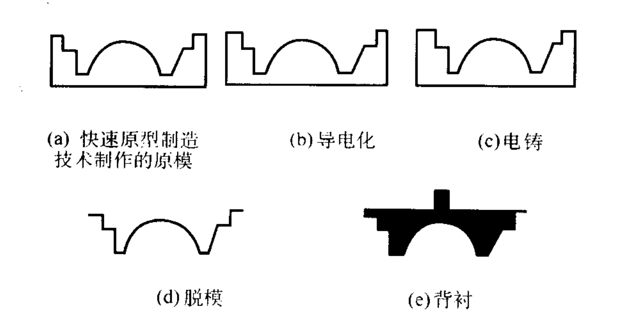


图4.6-16 电火花加工电极电铸制作过程

直接快速制取金属零件是快速成形领域内更令人感兴趣的发展方向。研究人员尝试将电铸技术直接运用于快速制造，利用喷射电铸液的方式进行选择性电铸，通过喷嘴相对原模作 X、Y、Z 方向的移动来完成金属零件的制取。由于喷射电铸液可减小阴极极化层厚度，所以可采用较大的电流密度，从而使局部沉积速度提高，体现了快速制造的理念。

总之，无论在传统精密制造领域还是在高新技术制造领域，电铸技术都已经得到了很多重要应用。随着科技的不断发展，其应用领域必将进一步得到拓宽。

4 电刷镀加工

电刷镀的原理同电铸一样，也是应用电化学阴极沉积原理，在工件（阴极）表面的选定部位快速沉积金属层的加工技术。主要用于修复工件的尺寸和几何精度，强化工件表面提高其使用寿命，改善工件表面的理化性能等场合。

4.1 加工原理

电刷镀时，工具镀笔接电源的正极，待加工零件接电源的负极。操作者手持蘸满镀液的镀笔，以适当的压力及一定的相对运动速度在零件表面上刷涂。在镀笔与零件接触的部位，镀液中的金属离子在电场力的作用下，扩散到零件表面，并在零件表面（阴极）获得电子被还原成金属原子沉积、结晶，就形成了镀层。图4.6-17表示电刷镀工艺的原理。

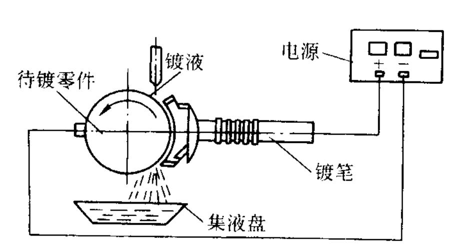


图4.6-17 电刷镀工艺原理示意

4.2 工艺要点

4.2.1 电刷镀工艺

电刷镀是电镀工艺的一种特殊形式，由于其主要功能不同于电镀的“防护”、“装饰”，而是具有鲜明的制造工艺色彩，所以被列入特种加工技术范畴。

电刷镀实施过程中，被镀工件与电源负极相连接，无需进入电镀槽，外包吸水材料层的不溶性阳极镀笔与电源正极相接，浸吸了电镀溶液后，以一定压力与工件表面接触形成反应回路，金属离子沉积在工件表面，形成镀层。镀笔在工件待镀表面继续移动，完成全部镀复任务。

镀笔透过包套材料与工件表面“接触”，并与选定的工件局部表面存在相对运动，可以使用比槽镀大得多的高电流密度，构成了电刷镀工艺的特殊之处。

电刷镀的优点在于：

1）不需要镀槽，可以对工件局部表面刷镀，设备简单，操作简便，机动性强，便于现场施工；

2）可刷镀的金属种类广泛，选用及更改都很方便；

3）镀层与基体金属结合强度较理想，刷镀速度远远高于槽镀，镀层厚度易于控制。

由于大多数刷镀对象受施工部位局限、以及施工要求繁多的影响，同时电刷镀操作也大多只有单件或几件的加工量，故多采用手工操作，生产效率和自动化程度都比较低，这是至今电刷镀工艺的主要不足之处。但对于部分具有平面、回转体内外表面等规则几何要素的工件、且电刷镀生产也具有一定批量，可以设计专用机床，采用计算机技术对刷镀运动轨迹、速度及刷镀加工参数进行控制。

4.2.2 电刷镀的工艺特点

电刷镀的工艺特点，可用“刷”字概括：

哪里需要镀层，就在哪里刷，不受零件大小和形状限制；

镀笔在刷的过程中，必须与被刷工件表面保持一定的压力和相对运动速度，阴、阳极相互位置的动态变化，使得还原不会仅在一点连续进行，限制了晶粒长大和排列，能够获得更细密的沉积金属层。相对运动还使得产生的氢气容易被驱散，减少了零件“氢脆”的可能。相对运动等同于对溶液搅拌，有利于克服浓差极化现象，使更多的金属离子有机会还原沉积。同时，能使用更大的电流密度参数，提高沉积速度。

制作刷子——镀笔的材料常用高纯石墨、不锈钢板和铂铱合金。镀笔与刷镀电源均具有体积小、质量轻、携带方便、操作简单、便于现场使用的特点。

4.2.3 电刷镀的典型工艺过程

实施电刷镀操作工艺，可根据待镀件的材料、表面热处理状况、工件尺寸及镀层厚度、工件技术要求及工况条件等因素正确安排工序、选择电压（电流）、相对运动速度等工艺参数和镀液，并科学地进行镀层技术设计。其中还要注意根据操作工序要求而及时改变工件的极性：电刷镀镀层操作时，电源正极与阳极手柄连接，电源负极与工件相连接，工件的极性是负极性；而在电刷镀镀层前，需要对工件表面进行活化处理，这时工件接电源的正极，此称工件正极性。实际操作过程，通过电源上的极性转换开关来改变极性。操作顺序的安排，可在电刷镀典型工艺过程的基础上，结合具体情况，适当增加或减少某些工序。

电刷镀的典型工艺过程见表4.6-2。

4.2.4 电刷镀工艺参数的选择

（1）刷镀电压

刷镀电压的高低直接影响着沉积速度和镀层质量。为了保证得到高质量的镀层和提高生产效率，应按每种溶液确定的电压范围灵活使用。

（2）镀笔与工件的相对运动速度

镀笔运动速度太慢时，与工件接触部位发热量较大，镀层易发黑，局部还原时间长，镀层生长太快，组织易粗糙。

若此时镀液供送不充分，还会造成局部离子贫乏，组织疏松。镀笔运动速度太快时，则会降低电流效率和沉积速度，镀层虽然致密，但内应力太大，镀层易脱落。相对运动速度通常选用 8 ~ 12 m/min，要结合零件大小，被镀表面形状，使用镀笔的大小和形状等情况具体而定。

表 4.6-2 电刷镀的典型工艺过程

工序号	工序名称	工序内容、目的	使用镀液（举例）	工件极性
1	表面准备	去除油污、修磨表面、保护非镀表面		
2	除油	电化学除油	电净液	负极
3	强活化	电解腐蚀表面，除锈，除疲劳层	2 号活化液	正极
4	弱活化	电解腐蚀表面，去除碳钢表面炭黑	3 号活化液	正极
5	镀底层	镀好底层，提高界面结合强度	特殊镍镀液	负极
6	镀尺寸层	快速恢复工件尺寸	镍快镀液	负极
7	镀工作层	达到尺寸精度，满足表面性能要求	镍钨合金镀液	负极
8	镀后处理	吹干、烘干、涂油、低温回火、打磨、抛光等		

（3）电刷镀的温度控制

1）工件温度：工件的理想温度为 15 ~ 35℃，最低不能低于 10℃，最高不宜超过 50℃。

2）镀液的温度：应保持在 25 ~ 50℃ 范围内，使溶液的物理化学性能如 pH 值、电导率、溶液成分、耗电系数、表面张力等保持相对稳定，使镀液的沉积速度、均镀能力、深镀能力及电流效率等始终处于最佳状态，所得到的镀层内应力小、结合性能好。

3）镀笔的温度：石墨本身有一定的电阻，加上电极反应的热效应，会使镀笔发热，温度升高。长时间高温下使用石墨阳极，镀笔表面会烧损和腐蚀。

（4）镀层厚度的控制和计算

电刷镀沉积层的厚度能够较精确地控制和计算。

在刷镀进行之中，为了避免沉积过程中断以及测量工件对镀层污染引起质量下降，是不允许测量镀层厚度的。可以利用电源所设的安培小时计累计刷镀总电量，实现对镀层的间接控制。根据法拉第定律，沉积的金属量为：

$$M = \eta k Q \tag{4.6-13}$$

式中，η 为刷镀时阴极的电流效率；k 为质量电化学当量，g/（A·h）；Q 为刷镀所消耗的电量，A·h；M 为阴极沉积金属的质量，g。

在镀层厚度均匀的表面上，沉积的金属质量可以这样计算：

$$M = 10^{-2} \rho A \delta \tag{4.6-14}$$

式中，ρ 为沉积金属的密度，g/cm³；A 为刷镀面积，dm²；δ 为镀层厚度，μm。

整理得到

$$Q = CA\delta \tag{4.6-15}$$

式中

$$C = \frac{10^{-2} \times \rho}{\eta k} \tag{4.6-16}$$

C 为仅与刷镀溶液和刷镀工艺条件有关的参数，称为耗电系数。根据式（4.6-16）可以从电量计计量值控制镀层厚度。当然，金属在沉积区域如何分布，是否均匀，还要依靠操作人员的技巧。此外，刷镀层也存在边缘效应，以上计算公式实用中应该加以考虑。

4.3 电刷镀的典型应用

4.3.1 电刷镀技术的应用范围

电刷镀技术的主要应用范围如下：

1）恢复磨损零件的尺寸精度和几何形状精度；补救加工超差产品；

2）填补零件表面的划伤、沟槽、压坑等缺陷；

3）改善零件表面性能。如强化零件表面；提高表面导电性；提高零件的耐高温性能；改善零件表面的钎焊性；减小零件表面的摩擦系数；提高零件表面的防腐性；

4）精饰零件等。

由于电刷镀新材料的不断出现，电刷镀工艺将不仅仅用于维修，而会更多地延伸到材料工程、制造工程甚至是微电子工程中去，一种简易获得优质材料的全新工艺将更加完善、成熟。

4.3.2 电刷镀工艺技术的研究及发展

1）电刷镀复合镀层的研究　采用复合电刷镀可在工件表面获得复合材料（复合镀层）。这种复合镀层具有硬度较高、耐磨、耐蚀、自润滑等多种优异性能，这是单一金属与合金镀层所无法比拟的。

复合刷镀与一般电刷镀的主要区别在于：复合刷镀要在镀液中加入一定量的不溶性固体微粒，并使其均匀地悬浮在镀液中。这些不溶性微粒能够吸附镀液中的正离子，发生阴极反应时，与金属离子一起沉积在工件表面而得到复合镀层。其余一些没有吸附正离子的不溶性固体微粒也随着镀液送到工件表面，它们虽不参与阴极反应，却在阴极反应时像杂质一样被镶嵌在镀层中，与前者获得同样的弥散强化效果。

2）无毒镀液配方的研究　电刷镀镀液常呈酸性，而且个别药品具有毒性，甚至剧毒，对环境和操作者的身体具有很大危害，一定要采取切实措施加以防止。

在镀液配方开发上，越来越多地重视研究使镀液低毒、无毒化，开发无毒的镀液，使其施工安全且镀层性能得到改善，镀液稳定性好，镀液成本低且制备容易等。无毒镀液的研究开发对于促进电刷镀技术的应用和发展有着重要意义。

3）在刷镀液中加入稀土综合添加剂的研究　如果在电刷镀溶液中加入适量的稀土综合添加剂（稀土元素以 RE 表示），就可以与氢形成 REH_2、REH_3 稀土氢化物，与氧形成 REO_3、REO 稀土氧化物；与氮形成 REN 稀土氮化物。

稀土元素化合物的形成，能大大降低镀层中气体元素的有害作用。稀土氢化物的形成，可以减少氢致裂纹，提高镀层抗疲劳强度，增加镀层安全厚度。稀土氧化物的形成，既减少了镀层中因片状氧化物造成的应力，又消除了分布在晶界上的微量杂质的有害作用，起到强化和稳定晶界的作用。稀土氮化物的形成，使氮化物以高度弥散的状态分布于镀层中，增加镀层的硬度、强度、耐磨性和耐蚀性。

由于稀土元素的相界、晶界的选择分布效应，因此能阻止晶粒长大，起到了细化晶粒的作用。

稀土元素的加入能在镀层表面形成一层富稀土合金层，该稀土合金层可在大气中氧化，形成牢固的保护膜，提高镀层的抗氧化和抗腐蚀能力。

另外，加入稀土元素还能提高镀层的沉积速率。

4）纳米电刷镀技术　近年来，纳米级颗粒材料在电刷镀技术中的应用，使复合电刷镀技术在耐磨领域呈现出强大



生命力。

添加固体微粒为纳米粉时，复合镀层的摩擦学性能有较大改善。纳米粉与镍共沉积，表现出比快速镍刷镀层更好的显微硬度和抗微动磨损性能。纳米电刷镀技术可望用于中温模具的修复，该项技术的推广应用还取决于电刷镀镀液稳定性的深入研究。

5）摩擦电喷镀技术的研究　摩擦电喷镀是在综合槽镀、刷镀、流镀等多项技术优点的基础上新发展起来的一项金属电化学沉积技术。它具有沉积速度快、镀厚能力强、镀层质量高等一系列突出优点。

摩擦电喷镀是一种金属镀层的电沉积和机械摩擦加工同时进行的技术。电镀时，将镀液以一定流量、一定压力连续喷射到阴、阳极之间，摩擦器以一定压力在阴极表面上滑动，起到机械摩擦镀层、提高镀层质量的作用。摩擦电喷镀装置见图4.6-18所示。

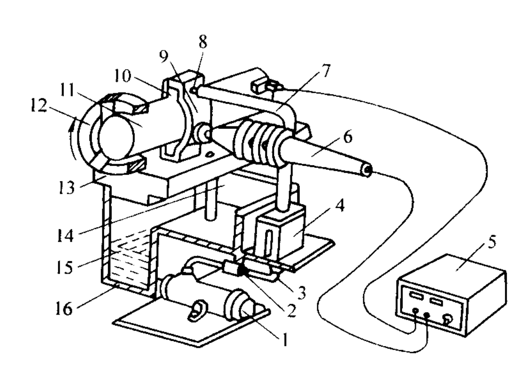


图4.6-18　摩擦电喷镀装置构成

1—磁力泵；2—流量调节阀；3—出液管；4—流量计；5—电源；6—镀笔杆；7—输液管；8—注液嘴；9—阳极；10—摩擦件；11—工件；12—夹具；13—回液盘；14—漏管；15—过滤网；16—储液箱

镀笔上的摩擦块随着镀笔与工件的相对运动摩擦新形成的镀层，摩擦作用能够限制镀层晶粒长大及镀层表面氧化膜的形成，还能有效地改善由工件表面粗糙引起的尖峰和凹坑造成沉积速度不一致的弊端。因而，摩擦电喷镀能获得组织致密、晶粒细化、力学性能良好的镀层，对改善镀层的孔隙率、表面粗糙度及镀层内部的应力状态都有明显的效果。摩擦电喷镀镀层孔隙率可以比常规刷镀镀层的孔隙率降低60%～90%。摩擦电喷镀镀层的表面粗糙度 R_a 为0.35～0.26 μm，最好可达到 R_a0.081 μm，已接近镜面。摩擦电喷镀镀层的最大拉应力值以及应力值的变化幅度都明显小于常规电刷镀，表明机械研磨作用的参与可有效地抑制刷镀过程中镀层应力的产生与扩大。

6）在复合表面技术方面应用的研究　每一种表面技术都具有其自身的优点与缺点，单一的表面技术往往不能满足实际工程的需要，这就促成了复合表面技术，以使其优缺点能够扬长避短、以长克短。

如电刷镀与离子氮化处理相结合的复合表面处理技术，使工件的承载能力比单纯电刷镀或者单纯离子氮化的工件承载能力成倍提高。

综上所述，电刷镀工艺是适应生产需求而发展的一项技术。由于众多优点使它成为机械零件修复和强化的重要工艺手段。

电刷镀工艺的全自动控制是其理想的发展方向，即能够适时检测刷镀液中金属离子的含量及刷镀表面具体状况，自动调整金属离子的还原速度和晶粒的成长过程，控制镀层的质量、沉积速度及厚度的变化。这样的计算机自动控制系统，既具有同手工操作那样的灵活性，又可克服人工操作所带来的盲目性和随意性，使镀层质量更加可靠，镀层性能更加提高。

电刷镀技术将在应用中促进新的进展，在发展中得到新的应用。

编写：云乃彰（南京航空航天大学）
曲宁松（南京航空航天大学）

第 7 章　复合电化学加工

1　电解磨削

1.1　电解磨削加工原理

1.1.1　电解磨削的基本原理

电解磨削是由电解作用和机械磨削作用相复合而进行加工的，比电解加工具有较好的加工精度和表面粗糙度，比机械磨削有较高的生产率。

图 4.7-1 是电解磨削装置构成简图。导电砂轮接直流电源的负极，被加工工件接正极，工件在一定的压力下与导电砂轮相接触。加工区域中送入电解液，在电解和机械磨削的复合作用下，工件表面很快被磨削，去除余量并达到一定的表面粗糙度。

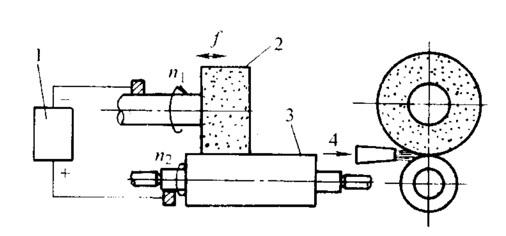


图 4.7-1　电解磨削装置构成简图
1—直流电源；2—导电砂轮；3—工件；4—电解液

图 4.7-2 是电解磨削加工原理示意图。在极间电压的作用下，电流从工件通过电解液流向导电砂轮，形成导电回路，于是工件（阳极）表面发生阳极溶解作用（电化学腐蚀），被氧化成为一层极薄的氧化物薄膜，一般称它为阳极钝化膜。但刚形成的阳极钝化膜迅速被导电砂轮中的磨料刮除，在阳极工件上又露出新的金属表面并被继续电解。这样，由电解作用和刮除薄膜的磨削作用交替进行，使工件连续地被加工，直至达到一定的尺寸精度和表面粗糙度。

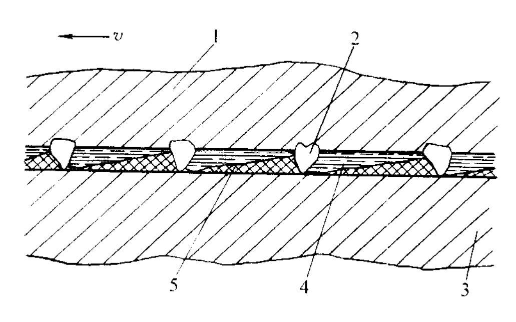


图 4.7-2　电解磨削原理示意图
1—导电砂轮结合剂；2—磨粒；3—工件；4—电解液；5—阳极薄膜

电解磨削过程中，电化学作用在工件表面形成阳极钝化膜，由砂轮磨削作用去除钝化膜并整平工件表面，而金属的去除取决于所采用的极间电压的高低，或主要靠电解作用（极间电压较高时），或主要靠机械磨削作用（极间电压较低时）。电解磨削时电化学阳极溶解的机理和电解加工相似，不同之处是电解加工时阳极表面形成的钝化膜是靠活性离子（如 Cl^- 离子）进行活化、或靠提高电极电位去破坏（活化）而使阳极表面的金属不断溶解、去除的，其加工电流很大，溶解速度也很快，电解产物的排除靠高速流动的电解液的冲刷作用；电解磨削时阳极表面形成的钝化膜是靠砂轮的磨削作用，即机械刮削去除的。因此，电解加工时必须采用压力较高、流量较大的泵，而电解磨削一般可采用小型离心泵。另外，电解磨削是靠砂轮磨料来刮除具有一定硬度和黏度的阳极钝化膜，其形状和尺寸精度主要是由砂轮相对工件的成形运动来控制的，因此，电解液中不能含有活化能力过强的活性离子如 Cl^- 等，多采用腐蚀能力较弱的钝性电解液，如以 $NaNO_3$、$NaNO_2$ 等为主要成分的电解液，以提高电解磨削成形精度。

1.1.2　电解磨削加工的特点

1）可加工高硬度材料　由于它可以靠电解作用去除金属，因此只要选择合适的电解液就可以用来加工任何高硬度与高韧性的金属材料。

2）加工效率高　以磨削硬质合金为例，与普通的金刚石砂轮磨削相比较，电解磨削的加工效率要高 3 ~ 5 倍。

3）加工精度与表面质量好　因为砂轮主要用于刮除阳极薄膜，磨削力和磨削热都很小，不会产生磨削毛刺、裂纹、烧伤现象，加工表面粗糙度可小于 $R_a0.16\ \mu m$。

4）砂轮损耗量小　以磨削硬质合金为例，普通刃磨时，碳化硅砂轮的磨损量为切除硬质合金质量的 400% ~ 600%；电解磨削时，砂轮的磨损量不超过硬质合金切除量的50% ~ 100%。与普通金刚石砂轮磨削相比较，电解磨削的金刚石砂轮的消耗速度仅为它们的 1/5 ~ 1/10。

5）需要对机床、夹具等采取防腐防锈措施；需要增加通风、排气装置；需要增加直流电源、电解液过滤、循环装置等附属设备。

1.2　电解磨削工艺和设备

1.2.1　影响电解磨削生产率的主要因素

1）电化学当量　电化学当量是按照法拉第定律计算出的单位电量理论上所能电解蚀除的金属量，例如铁的电化学当量为 133 $mm^3/(A\cdot h)$。电解磨削和电解加工一样，可以根据需要去除的金属量来估算所需的电流和时间。但由于电解时阳极上可能有气体被电解析出，多损耗一部分电能，或者由于磨削时还有机械磨削作用在内，节省了电解蚀除金属用的电能，所以电流效率可能小于或大于 1。由于工件材料实际上是由多种金属元素组成的，各金属成分以及杂质的电化学当量不一样，所以电解蚀除速度会有差别（尤其在金属晶格边缘），使表面粗糙度变差。

2）电流密度　提高电流密度能加速阳极溶解。对电解磨削，提高电流密度的途径主要有：①提高工作电压；②适当增加磨削深度；③提高电解液的电导率；④提高电解液温度。

3）导电砂轮（阴极）与工件间的导电面积　当电流密度一定时，通过的电量与导电面积成正比。阴极和工件的接触面积越大，通过的电量越多，单位时间内金属的去除率越大。因此，应尽可能增加两极之间的导电面积，以达到提高生产率的目的。当磨削外圆时，工件和砂轮之间的接触面积较小，为此，可采用“中极法”。如图 4.7-3 所示，在普通砂轮之外再附加一个中间电极作为阴极，工件接正极，砂轮不导电，电解作用在中间电极和工件之间进行，砂轮只起刮除钝化膜的作用，从而大大增加了导电面积，提高生产率。如果利用多孔的中间电极往工件表面喷射电解液，则生产率可更高。

4）磨削压力　磨削压力越大、工作台走刀速度越快，



阳极金属表面被活化的程度越高，生产率也随之提高。但过高的压力容易使磨料磨损或脱落，减小了加工间隙，影响电解液的输入，引起火花放电或发生短路现象，将使生产率下降。

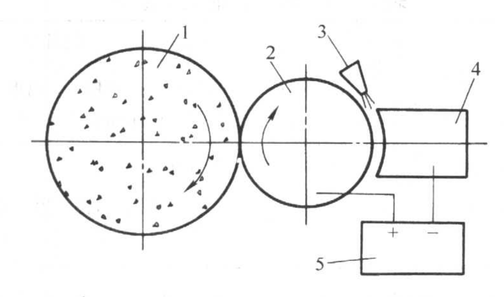


图 4.7-3 中极法电解磨削的原理图

1—砂轮；2—工件；3—电解液；4—阴极；5—直流电源

1.2.2 影响加工精度的因素

1）电解液 电解液的成分直接影响到阳极表面钝化膜的性质。如果所生成的钝化膜的结构疏松，对工件表面的保护能力差，加工精度就低。要获得高精度的零件，在加工过程中工件表面应生成一层结构紧密、均匀的、保护性能优良的阳极钝化膜。钝性电解液形成的阳极钝化膜不易受到破坏。硼酸盐、磷酸盐等弱电解质的水溶液都是较好的钝性电解液。

加工硬质合金时，要适当控制电解液的 pH 值，因为硬质合金的氧化物易溶于碱性溶液中。要得到较厚的阳极钝化膜，不应采用高 pH 值的电解液，一般 pH = 7 ~ 9 为宜。

2）阴极导电面积和磨料轨迹 电解磨削平面时，常常采用碗状砂轮以增大阴极面积，但工件往复移动时，阴、阳极上各点的相对运动速度和轨迹的重复程度并不相等，砂轮边缘线速度高，进给方向两侧轨迹的重复程度较大，磨削量较多，磨出的工件可能呈中凸形状（见图 4.7-4a），为此，可采用“复合轨迹”的办法来消除或减缓上述负面影响，如图 4.7-4b 所示。

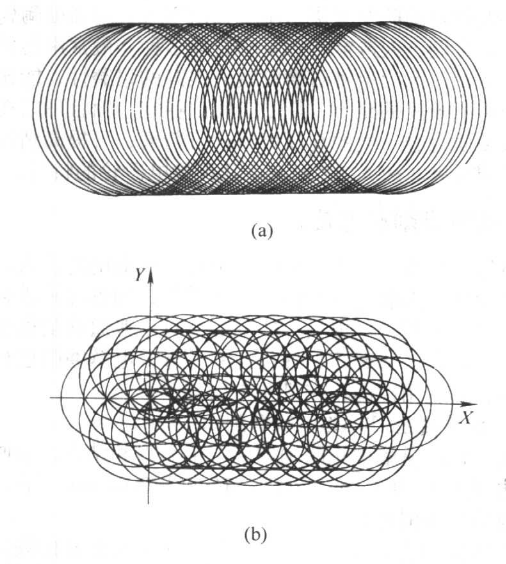


图 4.7-4 电解磨削磨粒运动轨迹对加工表面形状的影响

3）被加工材料的性质 对合金成分复杂的材料，由于不同金属元素的电极电位不同，阳极溶解速度也不同，特别是电解磨削硬质合金时，问题更为严重。因此，要研究适合多种金属元素同时均匀溶解的电解液配方，这是改善多金属材料电解磨削质量的主要途径。

4）机械因素 电解磨削过程中，阳极表面的活化主要靠机械磨削作用完成，因此机床的成形运动精度、夹具精度、磨轮精度对加工精度的影响是不可忽视的。其中导电砂轮占有重要地位，它不但直接影响到加工精度，而且影响到砂轮/工件极间状态，即影响砂轮/工件接触的紧密程度、或极间间隙的大小。电解磨削的加工间隙是由导电砂轮保证的，为此，除了精确修整砂轮外，砂轮磨料应选择较硬的、耐磨损的；采用中极法磨削时，应保持阴极的形状正确。

1.2.3 影响表面粗糙度的因素

1）电参数 工作电压是影响表面粗糙度的主要因素。工作电压低，工件表面电解溶解速度慢，钝化膜不易被穿透，对工件表面的加工以机械磨削作用为主，因而电解和磨削两者的加工作用都只在表面凸起处进行，有利于提高工件的整形和尺寸精度。因此，精加工时应选用较低的工作电压，但不能低于合金元素的最高分解电压。例如，加工 WC－Co 系硬质合金时，工作电压不能低于 1.7 V（因 Co 的分解电压为 1.2 V，WC 为 1.7 V）。加工 TiC－Co 系硬质合金时不低于 3 V（因 TiC 的分解电压为 3 V）。考虑到欧姆压降，其加工电压应更高一些。工作电压过低，会使电解作用减弱，生产率降低，表面质量变坏。过高时，加工则以电解去除为主，砂轮与工件表面之间甚至会产生类似于电解加工的间隙，则表面不易整平，使表面粗糙度恶化，电解磨削较合理的工作电压一般为 5 ~ 12 V。此外还应与砂轮切深、进给速度相配合。

电流密度过高，电解作用过强，表面粗糙度不好。电流密度过低，机械作用过强，也会使表面粗糙度变坏。因此，电解磨削时电流密度的选择应使电解作用和机械作用匹配恰当。一般讲，粗进给时，以去除余量为主，则选择电流密度高、电解作用强的参数；精进给时，则以保证整形和尺寸精度为主，故需选择电流密度低、电解作用弱、相对机械磨削作用占优的加工参数。

2）电解液 电解液的成分和浓度是影响钝化膜性质和厚度的主要因素。为了改善表面粗糙度，常常选用钝性或半钝性电解液。为了使电解作用正常进行，间隙中应充满电解液，因此电解液的流量必须充足，而且应予以过滤以保持电解液的清洁度。

3）工件材料性质 加工材料对加工表面粗糙度的影响如前所述影响加工精度的分析相同，由于材料中含不同元素、不同晶相结构，或材质缺陷、不均匀等原因而各处微观电极电位存在差异，从而引起不均匀溶解，影响加工表面的粗糙度。

4）机械因素 磨料粒度越细，越能均匀地去除凸起部分的钝化膜，另一方面使加工间隙减小，这两种作用都加快了整平速度，有利于改善表面粗糙度。但如果磨料过细，加工间隙过小，容易引起火花而降低表面质量。一般粒度可在 40 ~ 100 目内选取。

由于去除的是比较软的钝化膜，因此，磨料的硬度对表面粗糙度的影响不大。

磨削压力太小，难以去除钝化膜；磨削压力过大，机械作用过强，磨料磨损加快，使表面粗糙度恶化。

实践表明，电解磨削终了时，切断电源进行短时间的机械修磨，可改善表面的粗糙度和光亮度。

1.2.4 电解磨削用电解液的选择

电解磨削用电解液的选择，应考虑如下五方面的要求：①能使金属表面生成结构致密、黏附力强的钝化膜，以获得良好的尺寸精度和表面粗糙度；②导电性好，生产率高；③

对机床及工夹具腐蚀性小；④对人体无危害；⑤经济效果好、价格便宜、来源丰富，在加工中不易消耗。

要同时满足上述五个方面的要求是困难的。在实际生产中，应针对不同产品的技术要求，不同的材料，选用合适的电解液。表 4.7-1 列出了几种典型的电解磨削电解液。

表 4.7-1　电解磨削电解液

序号	电解液成分/%	适用场合	电流效率 η/%	电流密度 i/A·cm^{-2}	加工表面粗糙度 R_a/μm
1	$NaNO_2$ 9.6 $NaNO_3$ 0.3 Na_2HPO_4 0.3 $K_2Cr_2O_7$ 0.1 H_2O 89.7	硬质合金	80～90	10	0.1
2	$NaNO_2$ 3.8 Na_2HPO_4 1.4 $Na_2B_4O_7$ 0.3 $NaNO_3$ 0.3 H_2O 94.2	硬质合金	70	10	0.1
3	$NaNO_2$ 7.0 $NaNO_3$ 5.0 H_2O 88.0	硬质合金	85	10	0.1
4	$NaNO_2$ 10 $NaKC_4H_4O_6$ 2 H_2O 88	硬质合金	90	10	0.1
5	$NaNO_2$ 5.0 Na_2HPO_4 1.5 KNO_3 0.3 $Na_2B_4O_7$ 0.3 H_2O 92.9	组合材料（硬质合金与碳钢）	78	10	0.1
6	$NaNO_2$ 2 Na_2HPO_4 7 KNO_3 2 H_2O 89	低碳钢、中碳钢	78	10	0.4

上述电解液中，亚硝酸钠的主要作用是导电、氧化和防锈。硝酸盐的作用主要是为了提高电解液的导电性，其次是硝酸根离子有可能还原为亚硝酸根离子，以补充电极反应过程中亚硝酸根的消耗。磷酸氢二钠是弱酸强碱盐，使溶液呈弱碱性，有利于氧化钴、氧化钨和氧化铁的溶解；磷酸氢根离子还能与钴离子络合、生成钴的沉淀物，有利于保持电解液的清洁。重铬酸盐和亚硝酸盐一样，都是强钝化剂，而且可以防止金属正离子或金属氧化物在阴极上沉淀。硼砂作为添加剂，使工件表面生成较厚的结构致密的钝化膜，在一定程度上对工件棱边和尖角起到了保护作用。酒石酸盐是钴离子的良好络合剂，有利于电解液的清洁，促进钴的溶解。

需要特别指出的是，$NaNO_2$ 对人体有毒害作用，误食一定含量可能导致中毒，甚至死亡。因此，在保管、使用、直至最后废液处理的全过程，都要予以特别重视。

1.2.5　电解磨削主要工艺参数

电解磨削的工艺参数主要包括电解液配比、流量、温度、电流密度、加工电压、磨轮线速度及磨削压力等。电解磨削的主要工艺参数值见表 4.7-2。

1.2.6　电解磨削设备

电解磨削设备可分为电解工具磨、卧式或立式电解平面磨、电解外圆磨、电解内圆磨及电解成形磨。它与普通磨床的主要区别是：带有直流电源及电解液供给系统，工具与工件间绝缘，机床有防腐处理及抽风装置。

对电解磨削用的直流电源，要求有可调的电压（5～20 V）和较硬的外特性，最大工作电流视加工面积和所需生产率可自 10～1 000 A 不等。只要功率许可，一般可以和电解加工的直流电源设备通用。

表 4.7-2　电解磨削工艺参数

项目	电流密度 /A·cm^{-2}	加工电压 /V	磨削压力 /MPa	磨轮线速度 /m·s^{-1}	电解液		
					流量 /L·min^{-1}	温度 /℃	浓度 /%
一般值	30～50	8～12	0.2～0.4	20～30	1～1.5	20～30	5～30
可以达到	100	18		50			

供应电解液的循环泵一般用小型离心泵，但最好是耐腐蚀的。还应该有过滤和沉淀电解液杂质的装置。在电解过程中有时会产生对人体有害的气体，因此在机床上最好设有强制抽气装置或中和装置，至少应在空气流通较好的地点操作。

电解液的喷射一般用管子和扁喷嘴，喷嘴接在砂轮的上方，向工作区域喷注电解液。电解磨床与一般磨床相仿，在没有专用磨床时，可以用一般磨床改装，改装工作主要有：①增加电刷导电装置；②将砂轮主轴和床身绝缘，要避免电流在轴承的摩擦面间流过；③将工件、夹具和机床绝缘；④增加机床对电解液的防溅、防锈装置。为了减轻和避免机床的腐蚀，机床与电解液接触的部分应选用耐蚀材料。

电解磨削一般需要导电砂轮，常用的有铜基和石墨基两种。铜基导电砂轮的导电性能好，加工间隙可采用反拷法得到，即把电解砂轮接电源正极，进行电解，此时铜基逐渐被溶解下来，达到所需的溶解量（即加工间隙值）后，停止反拷，磨粒暴露在铜基之外的尺寸即为所需的加工间隙。铜基砂轮的加工生产率较高。石墨砂轮不能反拷加工，磨削时石墨与工件之间会火花放电，同时具有电解磨削和电火花磨削双重作用。但在断电后的精磨过程中，石墨具有润滑、抛光的作用，可获得较好的表面粗糙度。

导电砂轮的磨料有烧结刚玉、白刚玉、高强度陶瓷、碳化硅、碳化硼、人造宝石、金刚石等多种。最常用的是金刚石导电砂轮，因为金刚石磨粒具有很高的耐磨性，能比较稳定地保持两极间的距离，使加工间隙稳定，而且可以在断电后对象硬质合金一类的高硬材料进行精磨，可提高精度和改善表面粗糙度。表 4.7-3 列出了几种导电砂轮的特性。

1.3　电解磨削典型应用

电解磨削由于集中了电解加工和机械磨削的优点，因此在生产中已用来磨削一些高硬度的零件，如各种硬质合金刀具、量具、挤压拉丝模具、轧辊等。对于普通磨削很难加工的小孔、深孔、薄壁筒、细长杆零件等，电解磨削也显示出优越性，其应用范围正在日益扩大。

1.3.1　硬质合金刀具的电解磨削

用氧化铝电解砂轮磨削硬质合金车刀和铣刀，表面粗糙度可达 R_a0.2～0.1 μm，刃口半径小于 0.02 mm，平直度也较普通砂轮磨削的好。

采用金刚石导电砂轮电解磨削加工精密丝杠的硬质合金成形车刀，表面粗糙度可小于 R_a0.016 μm，刃口非常锋利，完全达到精车精密丝杠的要求。所用电解液为亚硝酸钠 9.6%、硝酸钠 0.2%、磷酸氢二钠 0.3% 的水溶液，加入少量的丙三醇，可以改善表面粗糙度。电压为 6～8 V，加工时的压力为 0.1 MPa。实践表明，采用电解磨削工艺不仅比单纯用金刚石砂轮磨削时效率提高 2～3 倍，而且大大节省了金刚石砂轮，一个金刚石导电砂轮可使用 5～6 年。



表 4.7-3　常用导电砂轮的种类与特性

种类	金属结合剂人造金刚石导电砂轮	树脂结合剂导电砂轮	陶瓷松组织渗银导电砂轮	石墨、碳素结合剂导电砂轮
磨料粒度	80～100 目	120～150 目	80～180 目	不含磨料
性能特点	磨料形状规则，硬度高，电解间隙均匀，磨削效率高，使用寿命长，成本较高。修整困难	砂轮不需要进行反极性处理，具有抗电弧和防止短路的性能，修整方便。磨削效率低，使用寿命短	有较好的抗电弧能力，可用一般机械修整方法修整磨轮	成形最方便，可用车刀修整成任何形状，具有良好的抗弧能力。磨削效率低，精度低，使用寿命短
用途	模具、刀具、内外圆磨削	模具、内外圆、成形磨削（简单形状）	模具、叶片榫齿、刀具、成形磨削	成形磨削（一般粗加工）

1.3.2　硬质合金轧辊的电解磨削

某硬质合金轧辊如图 4.7-5 所示。采用金刚石导电砂轮进行电解成形磨削，轧辊的型槽精度达 ± 0.02 mm，型槽位置精度达 ± 0.01 mm，表面粗糙度达 $R_a0.2\ \mu m$，工件表面无微裂纹、无残余应力等缺陷，不仅加工效率高，而且大大提高了金刚石砂轮的使用寿命，磨削比达 138。

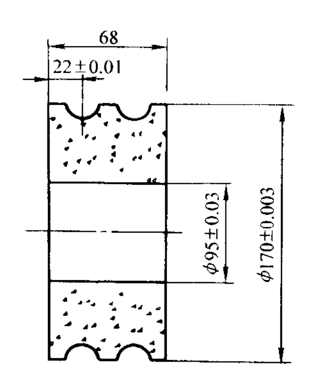


图 4.7-5　硬质合金轧辊

所采用的导电磨轮为金属（铜粉）结合剂的人造金刚石砂轮，磨料粒度为 60～1 000 目，外圆磨轮直径为 $\phi300$ mm，磨削型槽的成形磨轮直径为 $\phi260$ mm。

电解液成分为亚硝酸钠 9.6%，硝酸钠 0.3%，磷酸氢二钠 0.3%，酒石酸钾钠 0.1%，其余为水。粗磨的加工参数为电压 12 V，电流密度 15～25 A/cm^2，砂轮转速 2 900 r/min，工件转速0.025 r/min，一次进刀深度 2.5 mm。精加工的加工参数为电压 10 V，工件转速 16 r/min，工作台移动速度 0.6 mm/min。

2　电解磨料光整加工

2.1　电解磨料光整加工机理与特点

2.1.1　电解磨料光整加工基本原理

电解磨料光整加工是利用电化学腐蚀作用和磨料的机械刮膜作用相复合对金属工件表面进行加工的光整加工工艺，是电化学机械加工的一种形式。

电解磨料光整加工的基本原理如图 4.7-6 所示。以工具作阴极，工件为阳极。在工具与工件之间充有电解液和磨料构成的工作液。当接通直流电源后，将发生电化学反应，工件阳极产生阳极溶解，并在表面形成钝化膜，从而阻碍阳极正常溶解。此时，由于有磨料作用，可以刮除钝化膜，使阳极表面得到活化。工件原始表面凹凸不平，高点钝化膜首先被刮除，刮除后露出的新鲜金属表面高点继续受到电化学作用和磨料机械作用。这样，金属表面的高点部分不断去除，而金属表面的低点或凹陷部分受钝化膜保护，去除较慢，使得工件表面粗糙度值迅速降低。正是这种钝化、活化过程不断交替、反复进行，构成了整个电解磨料复合光整加工过程。因此，电解磨料光整加工是电解作用与磨料机械作用相复合形成的一种高效率的加工方法。工件表面金属的去除主要靠电解作用完成，磨粒起刮除钝化膜及整平表面的作用。

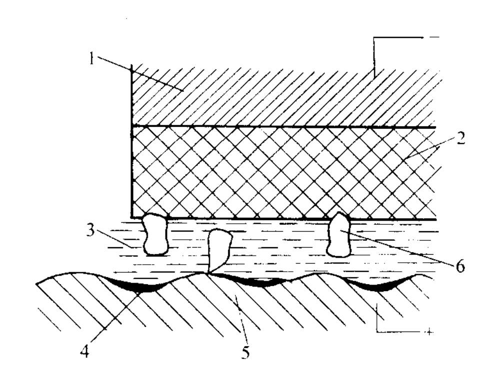


图 4.7-6　电解磨料光整加工基本原理示意图
1—阴极；2—衬垫；3—电解液；4—钝化膜；5—工件；6—磨料

图 4.7-7 为电解磨料加工装置简图，阴极上包覆一层弹性、透水性、耐磨性良好的合成纤维材料。按磨料是否黏附于合成纤维上，可将电解磨料光整加工分为固定磨料加工和流动磨料加工两类。

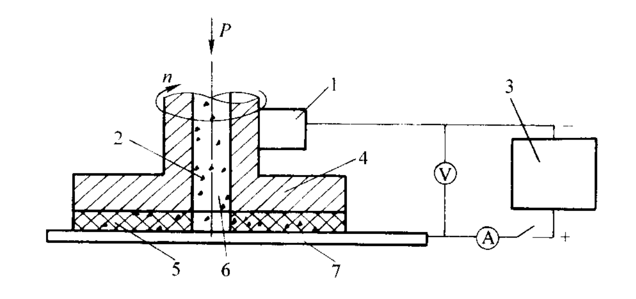


图 4.7-7　电解磨料光整加工装置简图
1—电刷；2—磨料；3—直流电源；4—阴极；
5—衬垫；6—工作液；7—工件

固定磨料式电解磨料光整加工的优点是装置相对简单，不需磨料泵；磨粒切削方式主要是刮擦，效率较高。但由于磨料固定在工具阴极上，切削运动轨迹具有一定规律；加之磨粒尺寸不能太小，否则磨料的固定工艺复杂且磨粒易被黏结剂包覆而丧失切削能力，因此加工后的表面粗糙度通常为 R_z0.1～0.2 μm，同时加工时磨料易脱落而导致工具材料需要定期更换。

流动磨料式电解磨料光整加工是将磨料混合到电解液中成为悬浮液送入加工区域，工具阴极上的抛光材料用来滞留并带动磨料对工件表面进行光整加工。由于该工艺不存在磨粒固定问题，可选择尺寸极小的磨粒。实际上，尺寸较小的磨粒（如 W5 以下）在悬浮液中分散性较好，可以更均匀地去除工件表面微观高点处的钝化膜；加之磨粒在抛光材料中位置的随机性及变速切削性决定了其运动轨迹的紊乱程度较高，形成的表面纹理的均匀性较好。因此，该工艺加工的工件表面粗糙度值很小，可达 R_a0.012 μm 以下。

2.1.2 电解磨料光整加工的特点

图 4.7-8 是电解磨料光整加工与单纯电解或单纯机械研磨加工效果的对比实验曲线。主要实验条件是：①阴极：ϕ60 mm 盘状，紫铜；②工件：1Cr18Ni9Ti，尺寸为 140 mm × 90 mm × 1.5 mm；③电解液：主要成分为 20% $NaNO_3$ 溶液，温度 20℃ ± 5℃，流量 50 L/min；④工具头：转速 420 r/min，进给速度 2 mm/s，压强 0.1 MPa；⑤极间间隙：Δ = 1.5 mm；⑥电流密度 i = 1 A/cm²；⑦磨料：Al_2O_3，粒度 W5，含量 15 g/L。

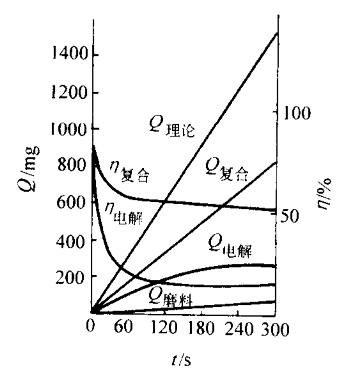


图 4.7-8 三种加工方法去除效果对比

大量研究的结果表明：电解磨料光整加工比纯电解抛光和纯机械抛光的质量都好，且加工速度快。具有以下特点。

1）材料适应性广　电解磨料加工主依靠电化学作用去除金属，通过选择合适的电解液和磨粒，对淬硬的高碳钢、合金钢及硬质合金等常规方法难以抛光的材料，均可很好的完成加工。

2）磨具损耗小　磨粒的主要作用是刮除零件表面的钝化膜，较之金属基体，钝化膜的硬度很低，因而磨具损耗小。

3）转换工序少，加工效率高、成本低　以粗糙度值为 R_a1.6 μm 左右的表面为例，若采用常规抛光工艺，通常需依次更换不同粒度的磨具经粗抛、精抛等工序以获取镜面；而采用电解磨料光整加工工艺，则可直接采用细粒度磨料，大大提高了加工效率，降低了成本。

4）表面质量好　电解磨料光整加工过程中，磨粒的机械刮削作用力很小，相对运动速度低，加工中不存在产生高温的条件，工件表面不会产生塑性变形层、残余应力、微观裂纹等表面缺陷；另外，加工表面微观几何形状比较理想：电解磨料光整加工是以电解、磨料共同作用去除高点，形成的表面微观几何形状呈"高原型"（如图 4.7-9b 所示），该类表面在耐磨性、耐腐蚀性及黏着性能等方面都远优于纯机械抛光形成的微观"尖峰状"表面（如图 4.7-9a 所示）。

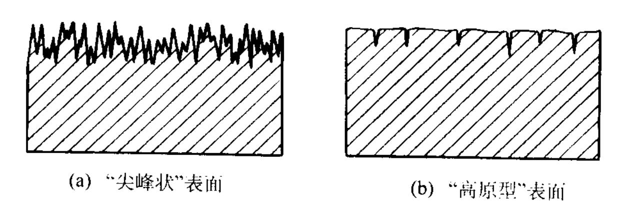


图 4.7-9 电解磨料光整加工表面微观几何形状

当然，加工效果受电化学作用和机械作用两方面的影响，工艺参数的选择与控制相对机械抛光要复杂一些。要获得高质量表面，必须正确选择工艺参数，特别要注意保证电化学作用与磨料机械作用的合理匹配。

2.2 工艺参数对光整加工质量的影响及参数选择

影响电解磨料光整加工质量的主要因素见表 4.7-4，以下分别进行讨论。

表 4.7-4 影响电解磨料光整加工质量的因素

工艺因素的影响		工件材料	其他因素
电化学作用部分	机械作用部分		
电流密度	磨料种类与粒度	工件材料成分与组织	环境清洁程度
电解液特性	工作液磨料含量（对流动磨料而言）	工件表面原始状态（缺陷、夹杂物、油污等）	加工区域流场均匀程度
电解液成分与浓度	磨料固定方式	材料处理状态	磨料粒度均匀程度
电解液流量及压力	工具头转速		振动状况
电解液温度	工具头压强		
	工具头进给速度		

2.2.1 电化学作用部分

1）电解液特性　所采用的电解液应具有较高的电导率，并且黏度要低，以便用较低加工电压达到较高的电流密度，同时能保证电解液既能充满加工区域又能保持一定流速；电解液不应含有向阴极镀覆的阳离子以保证阴极的形状尺寸不变；钝化膜的产生是电解研磨工艺快速降低表面粗糙度的关键，因而不能采用 NaCl 等线性电解液而应采用 $NaNO_3$ 等具有非线性特性的电解液。为改善加工效果和稳定加工过程，在电解液中可加入不同成分的添加剂。活性剂，可加入烷基磺酸钠等；络合剂，可加入聚磷酸盐与聚丙烯酯等；缓蚀



剂，可加入乙二醇等；整平剂，可加入尿素等；光亮剂，可加入葡萄糖等。

2）电解液浓度　电解液浓度越大，电解液电阻越小，相同电压下的电流密度也越大，生产率越高，但当浓度达到一定程度以后，某些电解液会表现出线性特性（如 $NaNO_3$，当浓度大于 30% 时会表现出线性特性），杂散腐蚀现象严重，不利于整平，所以浓度应控制一定范围内。另外，当电解液浓度过高时，在工夹具、工件上会有盐的结晶析出，这对加工很不利。综合各种因素，一般在 15% ~ 25% 的范围内选取电解液浓度比较合适。

3）电解液温度　加工区电解液温度直接影响钝化膜形成过程及钝化膜组织，也影响着电解液的电导率，因此，对表面质量有影响。研究发现，当电解液温度升高时，电导率也随之升高，电流效率可以提高。但也有研究发现，金属在较低的温度下易钝化，某些膜在较低的温度下才具有较好的黏附力，而温度升高时，黏附力减弱，膜会疏松，表面质量会下降。实际加工中，电解液温度一般控制在室温。

4）电解液压力、流速及流量　保证一定的电解液压力，是电解液充满磨轮/工件之间并保持流场均匀的条件，电解液具有一定流速与流量能使电解产物顺利排出电解区域，也可对磨轮/工件起冷却作用，保证加工区的温度不至太高。

5）电流密度　电流密度是决定电化学作用效果的重要因素，直接决定着加工过程中电化学作用的强弱。电流密度过大，阳极溶解剧烈，加工质量不稳定，特别是当电解区工作液不充分时，电解液发热现象严重，这对加工不利；电流密度过小，则去除量太小，加工效率降低，当原始表面粗糙度值较高时，电流密度对加工效率的影响更为显著。图 4.7-10 给出了 1Cr18Ni9Ti 在一定加工条件下，电流密度对去除量、表面粗糙度的影响规律。去除量随电流密度增加呈线性增加，而在一定的电流密度条件下，表面粗糙度达到了最小值，这说明在给定加工条件下，电流密度存在较佳范围。

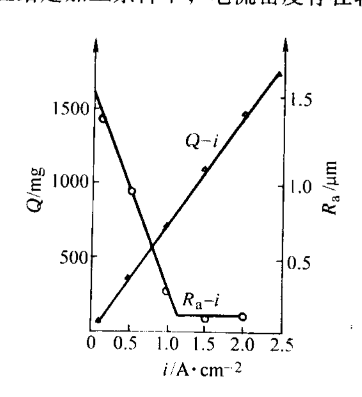


图 4.7-10　电流密度对加工质量的影响
其他条件：磨料粒度—44 μm；电解液浓度—20% $NaNO_3$；工具转速—420 r/min；工具压强—0.1 MPa

2.2.2　机械作用部分

1）磨料粒度　电解磨料加工过程中，由于磨料只起活化表面钝化膜的作用，所以磨粒的“微刃”角度以钝角较为理想。Al_2O_3 磨料不仅可以满足上述要求，而且价格低廉，比较合适。图 4.7-11 给出了粒度分别为 180 目、320 目、W14 时，磨料粒度对加工效果影响的实验曲线。在相同加工时间内，磨料粒度越大，去除量越大，表明其机械活化作用越强；在加工初期，磨料粒度越大，R_a 值降低速度越快，但到一定时间后，R_a 值不再降低，表明每种尺寸的磨粒对应一个“极限粗糙度值”，即时间再长，表面粗糙度也不会再改善。“极限粗糙度值”的存在，说明电解磨料加工最终的表面粗糙度值取决于加工所采用的磨料粒度。因此，磨料粒度应根据加工面所要求的粗糙度来选取。

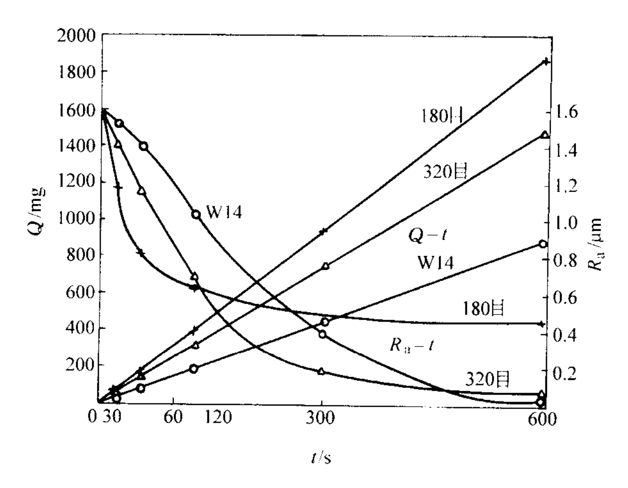


图 4.7-11　磨料粒度对加工效果的影响
其他条件：电流密度—1 A/cm²；电解液浓度—20% $NaNO_3$；工具转速—420 r/min；工具压强—0.1 MPa

2）磨料固定方式　磨料固定方式对加工质量也有较大影响（参见图 4.7-12）。对于粗糙度值要求较小的零件表面，通常应采用流动磨料做最后抛光；对表面粗糙度值可以高一些的表面，通常采用固定磨料方式，因为固定磨料方式加工效率一般要高于流动磨料方式。

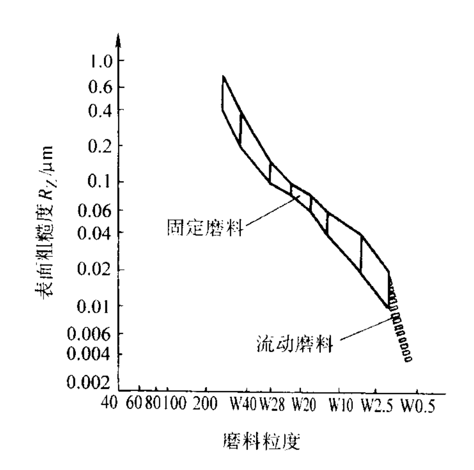


图 4.7-12　磨料固定方式对加工过程的影响
其他条件：电流密度—1 A/cm²；电解液浓度—20% $NaNO_3$；工具转速—420 r/min；磨料粒度—44 μm

3）工作液磨料含量　工作液中磨料含量决定着机械刮膜“微刃”的数量，对于机械活化及最终加工效果具有很大影响。图 4.7-13 表示了 1Cr18Ni9Ti 在一定加工条件下，表面粗糙度与工作液磨料含量、去除量与工作液磨料含量之间的关系。去除速度随着磨料含量的增加而增加，即工作液中磨料含量越大，机械活化作用越强，对提高加工效率有利。但含量过大，工作液流动性变差，磨料输送也有困难，易在管道中堵塞。另外，过多的磨料会在加工区阻碍电流的正常通道，不利于电化学作用的顺利进行。磨料含量通常为 15 g/L 左右。

4）工具头转速　工具头转速是决定机械作用强弱的重要因素。转速过低，机械刮膜作用弱，不利于迅速降低表面粗糙度，生产效率低；转速过高，机械作用过强，会对加工表面造成机械损伤。另外，转速太高还会带来工具头运动的不平稳、加工区供液状况恶化等现象。对于不同磨料固定方

式，转速的选择也有区别，常由实验确定。图4.7-14是工具转速对加工效果影响的一组实验曲线。根据工具头直径大小，工具头的转速可在200～400 r/min范围内选取。

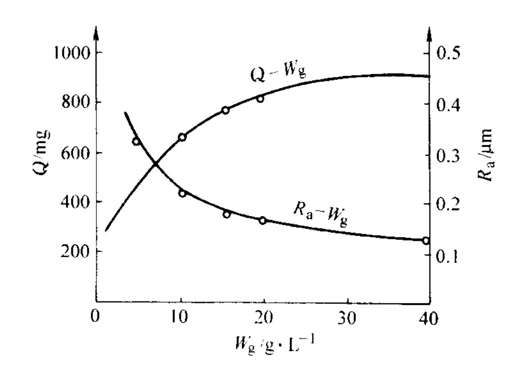


图4.7-13　工作液磨料含量对加工过程的影响

其他条件：电流密度—1 A/cm^2；电解液浓度—20% $NaNO_3$；工具转速—420 r/min；磨料粒度—44 μm

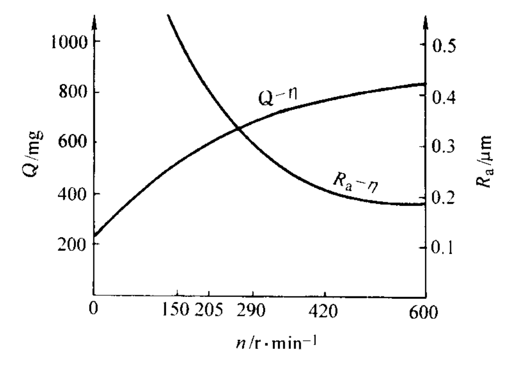


图4.7-14　工具转速对加工效果的影响

其他条件：电流密度—1 A/cm^2；电解液浓度—20% $NaNO_3$；工具压强—0.1 MPa；磨料粒度—44 μm

5）工具头压强：工具头压强对机械活化作用的影响极大。图4.7-15是工具头压力对加工效果影响的实验曲线。当压强较小时，电化学作用相对较强，机械活化作用不足(即电化学作用未能全部发挥出来)，随着压强增加，去除速度增加较快；当压强增至一定程度时，机械作用与电化学作用基本相匹配，即电化学作用生成的钝化膜恰好被磨粒刮除，此时，再增加压强时，去除速度增加减缓。当电化学作用加强时，压强值应随之增加。但是，过大的压强会使工具磨粒对零件表面产生机械切削作用，加工表面更易出现划痕，不利于提高表面质量，而且压强过大还会使工具损耗加快，增加了生产成本。因此，工具头压强的最终选取应参考电化学作用强弱、工具寿命等因素共同考虑，通常可在0.01～0.3 MPa范围内调节。

6）工具头进给速度　在实际加工中，工具头回转线速度较进给速度高出许多，因而，进给速度对工具磨料刮膜作用的影响可以忽略。在加工过程中，工具头进给速度应恒定，否则会影响加工表面的均匀性。适当提高进给速度对排除加工产物有利，因此进给速度不易太小，通常为1.5～15 mm/s。

2.2.3　工件材料的影响

1）工件的金相组织及热处理状态　金相组织对加工质量具有重要影响。金相组织中碳化物分布均匀，有利于提高加工表面质量和电流效率。一般而言，单相组织的材料具有较好的加工性能，而多相组织的材料的加工性能较差，此时，需采用复合电解液及特殊的电参数。

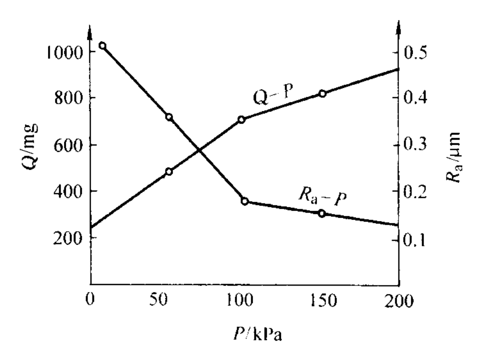


图4.7-15　工具压强对加工效果的影响

其他条件：电流密度—1 A/cm^2；电解液浓度—20% $NaNO_3$；工具转速—420 r/min；磨料粒度—44 μm

2）原始表面状态　一般情况下，只要材料原始表面比较平整，粗糙度在 R_a3.2 μm以下，均可直接进行加工。但材料表面若有夹渣、起皮等缺陷或有油污或其他附着物，会对电化学作用的均匀性产生影响，需进行预处理（清洗等）。

2.2.4　其他影响因素

电解液及加工环境的清洁程度对加工也具有很大影响，特别对于表面质量要求很高的工件，任何粗的硬颗粒进入加工区都会划伤加工表面。环境的清洁和磨料粒度的均一极为重要。另外，工艺系统振动对加工质量也有很大影响，应做适当控制。

总之，电解磨料光整加工的关键是使电化学作用与磨粒的机械活化作用相匹配，即应使机械活化作用恰好及时刮除电解生成的钝化膜。若机械作用不足，则去除钝化膜的能力低、整平能力差，生产率也低；若机械作用过强，则容易划伤工件表面，表面质量变差。增强电化学作用的主要手段是提高电流密度；增强机械作用的主要方法是提高工具压力、工具转速、磨粒含量等。在具体生产中，对应于不同材料、原始表面粗糙度和不同加工要求的工件，选择的工艺参数也不同，最优化的工艺匹配应根据实际情况参照上述各个因素对加工质量的影响规律由实验确定。

2.3　典型应用与发展

2.3.1　典型应用

电解磨料光整加工技术由于表面质量好、加工效率高，在生产实践中逐步得到推广应用，目前已应用于金属冷轧轧辊、大型船用柴油机轴类零件、大型不锈钢化工容器内壁以及太阳能电池基板的镜面加工。下面，简单介绍该技术在镜面轧辊制造、轴承滚道光整加工、模具抛光等方面的应用。

1）镜面轧辊光整加工　轧辊一般由含铬、钼、钒等元素的合金钢制造，热处理后强度、硬度均较高。以常用材料Cr12Mo制成的轧辊为例，经热处理后，常温硬度为58～62HRC。采用电解磨料光整加工技术对轧辊进行光整加工不受材料硬度影响，能使表面粗糙度得到快速降低。

加工实例：对某磨削后的轧辊表面进行电解磨料光整加工。工件的原始条件见表4.7-5。加工后，轧辊表面粗糙度达 R_a0.025 μm。图4.7-16是光整加工后的轧辊照片。

表4.7-5　工件表面原始状况

材质	硬度	原始表面粗糙度 R_a/μm	加工面直径 /mm	加工面长度 /mm
Cr12Mo	HRC61	0.8	120	1 000

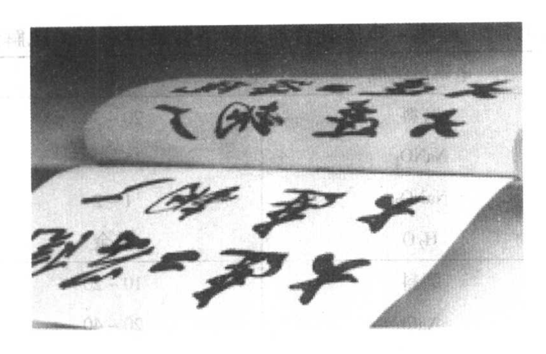


图 4.7-16　光整加工后的轧辊照片



图 4.7-17　光整加工后的模具型腔照片

2）模具型腔光整加工

模具型腔表面成形的主要方法是电火花成形加工和线切割加工，由于其加工机理是利用局部的瞬时高温作用使表面层金属材料局部熔化、气化并被抛离，故在加工过程中，加工表面会产生微观组织变化、再结晶、热损伤区、残余应力等。因此，该类表面比普通机械加工表面更难以抛光。另外，由于模具型腔表面的复杂性和多样性，目前主要的抛光手段仍是手工抛光，不仅效率低、劳动强度大，表面质量也难以保证。而由于前述电解磨料光整加工所具有的技术优点，在模具型腔光整加工中将有着广阔的应用前景。

例如，某模具材质为 P20，其型腔面积约为 180 cm^2，原始粗糙度值为 R_a1.6 μm。采用以 $NaNO_3$ 为主的复合电解液进行电解磨料光整加工，加工后表面粗糙度达 R_a0.04 μm。图 4.7-17 是光整加工后的模具型腔照片。

3）轴承滚道光整加工

目前轴承滚道的精加工多采用磨后超精加工，砂轮、油石易于堵塞，常造成加工过程不稳定，进而使加工表面质量恶化。磨具与工件相对速度高，加剧了上述问题的产生。在中大型轴承滚道光整加工中，由于加工面积大，原始表面粗糙度高，加工余量大，造成磨具堵塞更为严重。即使是先进的油石超精加工，同样具有机械切削作用的缺陷。

采用电解磨料光整加工轴承滚道，可使轴承滚道表面质量获得大幅度的提高，不仅表面粗糙度降低，表面形貌也发生了变化，表面轮廓支撑长度率分布特性改善，波纹度得到降低，有利于提高轴承寿命和降低轴承噪声，图 4.7-18 为加工后轴承滚道的实物照片。



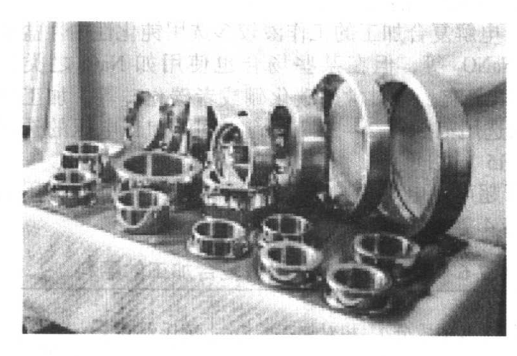


图 4.7-18　光整加工后的轴承滚道实物照片

2.3.2　发展前景

电解磨料光整加工自问世以来，发展迅速，应用领域不断扩大，已成功应用于镜面板材、化工反应釜、模具型腔、镜面轧辊等表面的光整加工，解决了很多关键技术难题，受到人们的普遍重视。最近的研究显示，采用电解磨料光整加工技术将齿轮齿面、轴承滚道加工至镜面后，可大幅度提高零件的使用性能和使用寿命，特别是噪声指标得到显著降低。这表明电解磨料光整加工技术在轴承、齿轮等摩擦副零部件制造领域具有推广应用价值。

但是，对于原始表面粗糙度较大的表面（大于 R_a 3.2 μm），直流电解磨料光整加工工艺的生产率还不够高。因此，近年来，人们开始脉冲电解磨料光整加工技术的研究工作。已有的研究表明，脉冲电解磨料光整加工比直流电解磨料光整加工具有更高的生产效率，有望成为一种由半精加工到精加工在一道工序内直接完成的有效手段。

目前，国内外定型的电解磨料光整加工机床还不多见。应加强开发针对特定零件的专用加工设备，结合自动化、自适应控制等技术开发通用的零件曲面光整加工系统，促进电解磨料复合光整加工技术的推广，尽早使这项技术系列化、标准化，更好地服务于经济建设。

3　超声－电解复合加工

3.1　超声－电解复合加工原理及工艺特点

3.1.1　超声－电解复合加工原理

超声－电解复合加工，是电解加工与超声加工两种工艺方法的复合。它以超声加工基本工艺环境作为复合工艺的实施基础，由激励源、超声换能器组成超声发生器，超声振荡激励通常采用电脉冲激励方式；工具通过变辐杆与超声发生器相连接，同时工具还必须接入电解加工电源的负极一端，成为超声－电解复合加工所使用的工具阴极；工件则接入电源的正极一端，成为阳极；提供悬浮磨料的液态载体为电解液。

超声－电解复合加工时，混有悬浮磨料的电解液以一定流速流经工具阴极和工件之间的间隙，工具阴极一方面自身作超声频振动，同时又以一定的速度向工件作进给运动。随着极间间隙减小，将发生电化学反应，工件产生阳极溶解，材料得以少量去除，此时工件表面被生成的钝化膜覆盖，阻止金属进一步电化学蚀除。由于工具阴极端部的超声频振动，电解液中的悬浮磨料颗粒对工件表面进行撞击和抛磨，

起到破坏工件表面钝化膜的作用，而超声空化效应更加剧了这种作用，随着钝化膜的去除，工件表面金属得以活化，继而重新溶解。图 4.7-19 是超声 – 电解复合加工示意图。

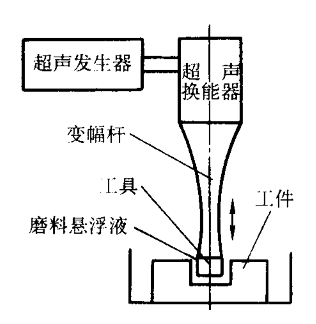


图 4.7-19 超声 – 电解复合加工示意图

在超声 – 电解复合加工过程中，工件表面呈现电化学钝化、活化的交替变化状态，材料的去除主要取决于电化学阳极溶解，钝化膜则对金属表面起到一种保护作用，工件主要加工部位上的钝化膜被磨料定域性地去除，使得金属溶解仅仅局限于该部位。超声 – 电解复合工艺改善了电解加工的定域性，提高了成形精度；同时，金属蚀除呈现微量渐进的特点，若磨料粒度及电解、超声工艺参数搭配得当，工件表面逐渐变得光滑，能够获得较好的表面质量；超声 – 电解复合加工的极间间隙一般小于单一电解加工的间隙，由于超声作用，电解产物的排出条件得以改善，加工速度和过程稳定性均有提高。

3.1.2 超声 – 电解复合加工工艺特点

超声 – 电解复合加工的工作液较多选用钝化性中性盐电解液，如 $NaNO_3$ 等，但在某些场合也使用如 NaCl 之类的“活化性”电解液。磨料常用碳化硼或者碳化硅等。加工电流密度 i 的选用范围在 2 ~ 35 A/cm² 之间，加工电压的选用范围在 4 ~ 15 V 之间。

适用于超声 – 电解复合加工的磨料见表 4.7-6，常用的电解液见表 4.7-7。

表 4.7-6 适用于超声 – 电解复合加工的磨料

磨料材质	基本成分	相对加工能力	莫氏硬度	密度 $/g\cdot cm^{-3}$
氮化硼	BN	1.1	11	3.45
金刚石（粉）	C	1	10	3.5
碳化硼	B_4C	0.5 ~ 0.6	9	2.5
碳化硅	SiC	0.25 ~ 0.45	9	3.2
刚玉	Al_2O_3	0.14 ~ 0.16	8	3.9

表 4.7-7 超声 – 电解复合加工常用含悬浮磨料的电解液

电解液组成	成分/%
磨料	20 ~ 30
$NaNO_3$	15 ~ 20
$NaNO_2$	1 ~ 2
H_2O	其余
磨料	10 ~ 20
NaCl	20 ~ 40
$NaNO_2$	1 ~ 2
H_2O	其余
磨料	20 ~ 30
KNO_3	15 ~ 20
$NaNO_2$	1 ~ 2
H_2O	其余

表 4.7-8 列出了超声 – 电解复合加工合金材料的工艺性能，表 4.7-9 给出了采用超声 – 电解复合工艺加工硬质合金环型凹模的基本参数。表 4.7-10 列出了若干难切削材料超声 – 电解复合加工与单一超声加工的对比数据。表 4.7-8 俄罗斯牌号中的元素符号对应为：X – Cr，B – B，H – Ni，M – Mn，Ф – V，T – Ti，Ю – Al；牌号中末尾符号 A 表示材质为高级、优质。

表 4.7-8 超声 – 电解复合加工合金的工艺性能

材料			体积去除率 $/mm^3\cdot min^{-1}$	可加工性 /%	工具相对损耗 /%
类别	俄罗斯牌号	中国相似牌号			
硬质合金	ВК20	YG20	400	100	6.0
硬质合金	Т15К6	YT15	350	88.0	6.5
钢	СТ45	45	310	77.5	7.1
马氏体不锈钢	20Х12ВНМФ		305	76.2	7.8
高温合金	ХН77ТЮ		293	78.3	8.2
电热合金	0Х27Ю5А		280	70.0	9.3
高温合金	ХН65ВМТЮ		267	66.7	12.0

图 4.7-20、图 4.7-21、图 4.7-22 表示了电解 – 超声复合加工的一些工艺性能。

表 4.7-9 超声 – 电解复合加工硬质合金环型凹模的基本工艺参数

工序转换	工具静压力 P/N	加工电流 I/A	加工电压 U/V	电解液压力 P_1/MPa	工具进给速度 $v/mm\cdot min^{-1}$	工具相对损耗 /%	工具振幅 $a/\mu m$	超声频率 f/kHz
加工环形槽和闭锁环	80 ~ 90	80 ~ 85	5 ~ 6	0.07 ~ 0.08	1.7 ~ 1.9	8.0 ~ 8.5	45 ~ 49	21.75
加工环面和沉头锥孔	140 ~ 160	150 ~ 160	6 ~ 8	0.2 ~ 0.225	0.12 ~ 0.14	5.0 ~ 5.5	22 ~ 24	19.6
加工闭锁环槽和环面	120 ~ 140	140	5.5	0.12 ~ 0.14	0.3 ~ 0.32	6.6 ~ 7.2	35	20.32



续表 4.7-9

工序转换	工具静压力 P/N	加工电流 I/A	加工电压 U/V	电解液压力 P_1/MPa	工具进给速度 v/mm·min^{-1}	工具相对损耗 l/%	工具振幅 a/μm	超声频率 f/kHz
加工沉头锥孔	180	180	7	0.17~0.18	0.25~0.28	5.7~6.8	28	19.35
加工全部平面	180~200	200~250	6~8	0.25~0.28	0.085~0.09	5.0~5.5	22	21.2

表 4.7-10　若干难切削材料超声－电解复合加工与单一超声加工的比较

材料	超声－电解复合加工					超声加工			
	超声频率 f/kHz	工具振幅 a/μm	电流密度 i/A·cm^{-2}	加工速度 v_{LDC}/mm·min^{-1}	工具损耗 l/%	超声频率 f/kHz	工具振幅 a/μm	加工速度 v_{LC}/mm·min^{-1}	工具损耗 l/%
5CrNiW 淬火钢	17.3	50	32	0.30	46	17.5	50	0.10	206
耐热合金	17.9	49	32	0.25	57	17.5	49	0.12	171
耐热合金	18.1	50	32	0.24	51	18.1	50	0.13	209
耐热合金	18.5	26.5	32	0.08	57	18.7	26.5	0.04	180
T15K6 硬质合金	18.8	26.5	30	0.20	50	18.8	26.5	0.08	100

注：试验条件：加工面积 22 mm²；磨料 240 目碳化硼；工具静压力 0.67 N/mm²；悬浮液中磨料质量浓度 1.25 kg/dm³；电解液成分为 30% NaCl。

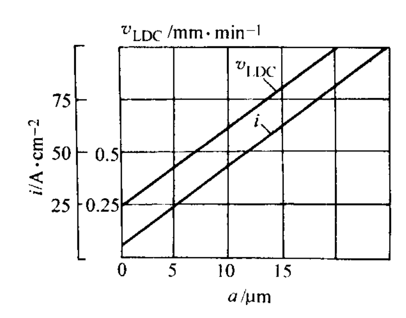


图 4.7-20　超声－电解复合加工电流密度、工具阴极进给速度与工具振幅的关系

注：采用阶梯式变幅杆，超声振动频率 22 kHz，工具静压力 100 N，工件转速 1 000 r/min，加工电压 5.5 V，电解液成分为 50 g/L $NaNO_3$ + 50 g/L $NaNO_2$，压力 0.6 MPa

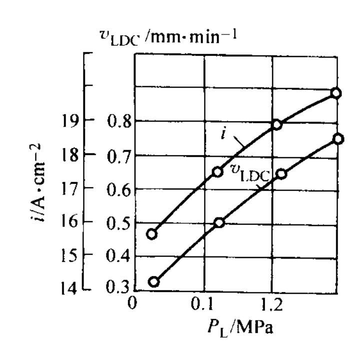


图 4.7-21　超声－电解复合加工电流密度、工具阴极进给速度与工具压力的关系

注：采用阶梯式变幅杆，超声振动频率 22 kHz，工具振幅 20 μm，工件材料 BK15（俄罗斯牌号，相当于中国 YG15），加工电压 4.5 V，电解液成分为 50 g/L $NaNO_3$ + 50 g/L $NaNO_2$，压力 0.5 MPa，温度 17~18℃。

超声－电解复合加工质量去除率 W'_{DC}可以借助系数 K_{DC} 来估算，K_{DC}视不同的超声加工与电解加工条件的组合而有很大的区别，其范围在 3~12 之间。

超声－电解复合加工质量去除率 W'_{DC}和单一超声加工质量去除率 W'_C 的关系为

$$W'_{DC} = W'_C K_{DC} \tag{4.7-1}$$

超声－电解复合加工硬质合金的最高生产率可以达到 400 mm³/min，相应条件为：浓度为 15% 的 $NaNO_3$ 电解液加压供给，选用碳化硼磨料，工件毛坯材料为 BK15（俄罗斯牌号，相当于中国牌号 YG15）。加工精度与电流密度有关，在 ±0.06~ ±0.1 mm 之间。

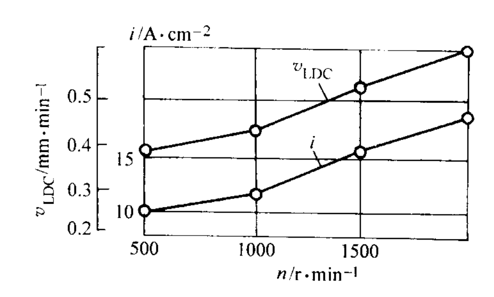


图 4.7-22　超声－电解复合加工电流密度、进给速度与工件转速的关系

注：采用阶梯式变幅杆，超声振动频率 22 kHz，工具振幅 20 μm，工件材料 BK15（俄罗斯牌号，相当于中国 YG15），工具静压力 70 N，加工电压 6 V，电解液成分为 50 g/L $NaNO_3$ + 50 g/L $NaNO_2$，压力 0.45 MPa，温度 32℃，工具不旋转。

在表 4.7-11 中，以折算的方法对超声－电解复合加工和单一超声加工去除速度做了比较。

表 4.7-11　超声－电解复合加工和单一超声加工去除速度比较

被加工材料	工具振幅 a/μm	超声频率 f/kHz	单一超声加工速度 v_{LC}/mm·min^{-1}	超声—电解复合加工速度 v_{LDC}/mm·mim^{-1}
工具钢 5XHB	25	17.5	0.1	0.3
硬质合金 T15K6	13	18.8	0.08	0.2

注：加工条件：单一超声加工及超声－电解复合加工中，工件加工面积均为 22 mm²；均选用粒度为 5 μm 的碳化硼磨料，在工作（电解）液中的质量浓度为 50%；超声－电解复合加工使用 30% 的 NaCl 电解液，电流密度为 30~32 A/cm²。

图 4.7-23 表示超声－电解复合加工超硬合金材质工件

(深度较浅)时，工具阴极施加不同静压力，加工时间随加工深度变化的关系。

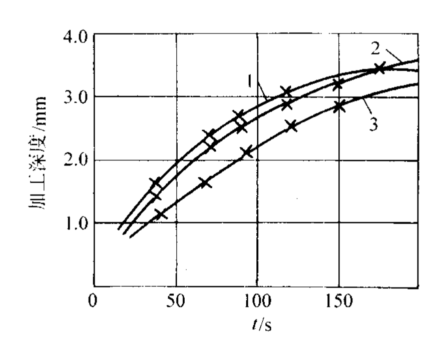


图 4.7-23 超声－电解复合加工超硬合金工件（深度较浅），**工具阴极施加不同静压力，加工时间随加工深度变化的关系**

工具静压力 1—2.15 MPa；2—1.1 MPa；3—0.7 MPa

在超声－电解复合加工间隙内，由于磨料同时也对工具阴极撞击和抛磨，因此工具阴极不会象单一电解加工那样理论上没有损耗，随着工件数量增多或加工深度增加，工具阴极损耗将加大。例如，加工硬质合金时，工具阴极的最大体积损耗约在 15%～20%之间，加工钢时，工具阴极的最大体积损耗则在 5%～10%之间。当然，超声－电解复合加工的工具阴极损耗要比单一超声加工的工具损耗低得多。

部分导电材料采用超声－电解复合加工工艺时，去除速度、工具阴极损耗的情况可以在表 4.7-12 中看到。

表 4.7-12 部分材料超声－电解复合加工的去除速度及工具阴极损耗

工件材料	工具振幅 $a/\mu m$	加工电流密度 $i/A\cdot cm^{-2}$	金属去除速度 v_{LDC} /mm·mim^{-1}	工具阴极损耗 /%
工具钢 5XHB	25	32	0.3	46
镍基耐热合金	25	32	0.24	51
超硬合金 T15K6	13	30	0.2	50

注：工件材料为俄罗斯牌号，加工面积为 80 mm²；采用 30%的 NaCl 电解液；碳化硼磨料，粒度为 16 μm。

3.2 研究现状和应用前景

超声－电解复合加工适用于导电材料如超硬合金、耐热工具钢等的加工，和其他超声复合加工一样，该复合工艺在模具型腔成形中具有推广应用价值。

超声－电解复合加工还可以使用带有悬浮磨料的盐、碱、酸的水溶液，比如 NaCl、Na_2CO_3、NaOH、$NaNO_3$ 等，有时还需要添加少许阻蚀剂。

采用超声－电解复合工艺加工 YG 类硬质合金，选择50～100 g/L 的 $NaNO_3$ 电解液和 100 g/L 的 NaOH 溶液，能够获得更高的去除速度。

另有一种方法，是以一定压力向加工区供给电解液，再加上真空抽吸方式及时顺畅地排除加工废液及产物，使用 15%的 $NaNO_3$ 电解液，以超声－电解复合工艺加工面积达 700 mm² 的 YG 类硬质合金，当电流密度为 20 A/cm² 时，金属去除速度可以达到 0.2～1 mm/min。

使用粒度为 4～8 μm 的碳化硼磨料，电流密度为 12 A/cm²，超声－电解复合加工工件的表面粗糙度值可达 R_a0.8～1.25 μm。

电解加工具有“离子”方式去除材料的机理，存在通过有效控制实现精密加工的理论空间。为提高并控制成形精度，常规电解加工需要改善阳极溶解的定域性，常选用钝化电解液，但如果工件表面钝化膜难以按需求破坏，电解作用就不能持续进行。超声加工工作液中的振动冲击波及“空化”作用十分有利于改善加工状况，向电解加工引入超声振动，利用微细磨料抛磨及工作液的冲击及“空化”综合作用，能够消除工件表面的钝化膜，改善加工区工作状况。

基于上述分析，目前有学者尝试将超声－电解复合加工方法引入微电流电解过程，电解作用在工件表面产生厚度极薄、强度远低于基体材料的钝化膜，以避免通常大电流密度电解时产生的杂散腐蚀作用，再利用超声作用去除指定范围的钝化膜，期望加工型面将完全根据阴极形状精确成形，用以探求电解微细加工的工艺途径。

4 电解－电火花复合加工

4.1 电解－电火花复合加工原理及工艺特点

4.1.1 电解－电火花复合加工的产生与发展

电解－电火花复合加工是电解和电火花复合去除金属的加工方法。由于它具有独特的工艺性，引起专家学者的关注。

有时，电解加工中会出现火花的现象；同时，通过对电火花加工工作液的研究，人们开始接触小间隙下电解液中放电的问题。电解加工中出现火花的现象，主要是由于电流密度大于所限制的电流密度而引起阳极电位的急剧升高，致使电极间隙电解液中的气体发生电离击穿导致电弧所致。电流密度超过一定值就能在阳极的气泡处发生击穿，研究脉冲电流下进行电解加工时出现火花的情况，发现电流过载引起的电流和电压的突变是产生火花的条件之一。极间电解液的瞬时热量对产生火花也有影响。降低电解液的流速容易引起气体在极间的堆积，从而容易引起火花的产生。由此可见，电解加工中的火花与高电压、大电流密度和极间的气体堆积有关。

在电火花加工中，由于常用的油类碳氢化合物物质在放电过程中产生大量炭黑，严重影响着放电过程和电蚀产物的排除，影响加工速度。于是，在探索介质时，发现水是较为理想的一种，水具有流动性好、冷却性好、不燃、无味、价廉等特点，便进行了水中的电火花加工研究。水是一种弱电解质，会产生电解过程，而对加工过程产生了较大的影响。水中放电加工时，虽然生产率提高，电极损耗减小，表面粗糙度值降低，但加工精度也降低。随着对其认识的深入，人们考虑在电解液中进行放电，作为一种独立的加工方法进行研究，发扬其优点，克服其不足，这便是出现电解电火花复合加工技术研究的缘由。

由于电化学溶解与电火花蚀除的复合过程可以用同一类水基工作液、同类的脉冲电源，有可能在同一套设备上实现不同要求的加工，具有一定生产应用前景，故国内外学者近二十年来进行了许多研究工作。20 世纪 80 年代在机理和穿孔加工方面进行了大量探索，不仅实现了电解电火花的复合过程，而且获得了高效率。20 世纪 90 年代进行型腔复合加工的研究，在工作液、工艺参数、复合电源等方面开展了较系统的试验研究，同时还在复合光整加工方面进行研究，获得较大进展，效果显著。

4.1.2 电解－电火花复合加工的基本原理

电解－电火花复合加工过程与传统的电解加工和电火花加工过程的不同之处是：与电解加工相比，采用了高电压脉冲与低电压直流复合的电源，高电压脉冲利于击穿极间间隙工作液后产生火花放电（甚至电弧放电），去除金属材料；与电火花加工相比，采用电导率良好的电解液作工作液，而且在工件与工具之间电解液的流动速度较高，这样一方面可

以及时带走加工产物和热量，另一方面在高压脉冲停歇时充分发挥电解去除作用。其加工原理如图 4.7-24 所示。

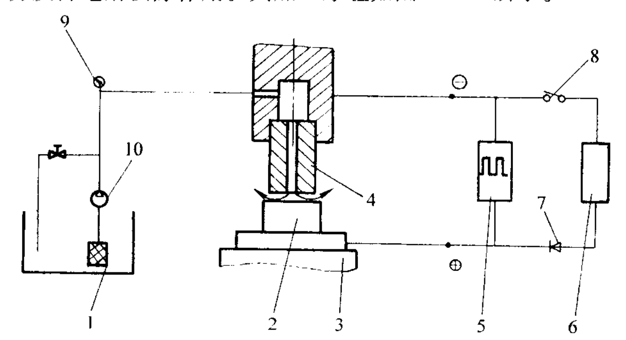


图 4.7-24　电解－电火花复合加工原理示意图
1—电解液槽与过滤系统；2—工件；3—机床；4—电极（阴极）；5—脉冲电源；6—硅整流电源；7—隔离二极管；8—开关；9—液压表；10—电解液泵

电解－电火花复合加工实际上是在电解液中（通常，采用水基低浓度复合工作液）的放电加工，其基本过程是：调整机床主轴使阴极 4 与工件 2 保持一个初始间隙 Δ_0，开启电解液泵使电解液从阴极和工件的初始加工间隙以较高速度流过，通电后由于电解作用在加工区产生大量气体并逐渐将电极表面覆盖，进而将电极表面形成的气体膜击穿，使间隙局部之液相气化并击穿放电。在此过程中，放电作用不仅能去除金属，同时还可以破除阳极钝化膜对电解作用的影响，改善电解加工的条件，使电解作用得到有效的发挥。放电作用的大小与电解液的成份和浓度有关，试验证明，采用 NaCl 和 $NaNO_3$ 水溶液进行钢质零件加工时，若电解质含量 C ＞5 g/L，则以电解去除金属为主。电解液中的击穿放电与一般绝缘介质中的击穿放电不同，它是属于气液两相组成的复合介质中的击穿放电。复合介质中的气相主要是由于电化学反应生成。所以这种击穿放电过程可以描述为：首先由电解作用产生气体，接着在电极表面生成完整的气体膜，进一步气体膜被击穿，使极间电场发生畸变，引起液相物质气化并击穿，最终形成两极间的击穿通道，发生放电。

4.1.3　电解－电火花复合加工的工艺特点

电解－电火花复合加工有其独特的工艺特点，将其归纳如下。

1）与绝缘介质中电火花加工的击穿放电相比有很大不同：①击穿电压值比绝缘介质中的小；②击穿延时比绝缘物质中的大成百倍，如电解液中放电延时为 $10^{-4} \sim 10^{-5}$s，而煤油中放电延时为 $10^{-6} \sim 10^{-7}$s；③在一定的极间距离范围内，击穿电压与极间距离无关；如极间距离大于 0.05 mm 时，极间击穿电压保持在 21 V 左右，不随电解液浓度，极间距离和充电电压的变化而异。

2）在实际加工中，电解作用与放电作用随电解液的不同而变化。实验证明，不同组分的电解液及不同的浓度不仅影响放电过程，而且还影响电解作用和放电作用的进行。如采用 $NaNO_3$ 电解液加工 45 钢，当浓度由 0 逐渐增加为 5g/L 时，电解电火花复合加工就由放电蚀除为主逐渐变为以电解去除为主；当浓度大于 50 g/L 时，放电蚀除量只占 2% 左右，这时放电作用只对电解起改善（如击穿钝化膜）补充作用，电解去除的速度可以很高，保持在理论计算值附近。

3）在实际加工中，电火花放电与电弧放电（短电弧）可通过电源的电参数选择来控制，当脉冲宽度为 250 μs 以下时，主要是电解电火花复合加工，当脉冲宽度在 1 000 μs 以上时主要是电解电弧放电复合加工。前者加工精度与表面粗糙度较好，后者放电电流很大，放电点大，熔化金属量多，蚀除速度快，但表面粗糙度差。

4）由于放电作用可消除间隙中的“搭桥”和短路点，可以实现在小间隙下进行加工，则可以获得高的加工精度和好的加工稳定性。

5）电解－电火花复合加工用的阴极侧壁不需绝缘保护，但阴极和夹具设计更复杂一些，需要考虑具有一定流速的复合工作液的流场设计问题。

6）电解－电火花复合加工时，由于放电现象的存在，因此使阴极有一定损耗，这是此项工艺的主要缺点，由此而影响了其在型面加工中的应用。阴极损耗量与工艺参数的选择有关，合理选择可使阴极的损耗控制到很小。

4.2　电解－电火花复合加工的研究、应用和发展

4.2.1　工作液的研究

针对材料 40Cr 钢，TC4 钛合金，YT15 硬质合金，进行了复合加工工作液的优化试验研究，不同工作液的加工性能列于表 4.7-13。由表 4.7-13 可知，在进行电解电火花复合加工时，采用单一的电解液不易得到良好的工艺效果，应根据不同材料合理配制复合工作液。

表 4.7-13　电解－电火花复合加工工作液

工作液配方	生产率	加工精度	表面质量	电极损耗	加工材料
1% ~ 3% $NaNO_3$	高	较高	较好	较小	40Cr, YT15, TC4
0.25% NaCl + 1% $NaNO_3$ + 4% <SX－1>	高	高	较好	较小－小	40Cr, TC4
0.3% NaCl + 1% $NaNO_3$ + 10% <SX－1> + 0.6%柠檬酸三钠	高	高	较好	小	TC4
1% $NaNO_3$ + 0.16NaOH + 0.26%酒石酸钾钠	较高	高	好	小	YT15

注：<SX－1>是一种电火花线切割乳化液（浓度 10% 时，pH = 8）。

4.2.2　电源波形的研究

在进行复合加工电源波形研究时，用如下几种波形的电源进行复合加工效果的比较试验：①晶体管脉冲方波电源；②三相全波整流电源；③相全波整流电源；④脉冲方波与三相全波电源复合；⑤冲方波与单相全波电源复合。其试验结果列于表 4.7-14。

表 4.7-14　复合加工的电源波形

电源波形	生产率	加工精度	表面质量	电极损耗	使用范围
脉冲方波 + 附加电容	低	高	差～较好	大	40Cr，YT15，TC4
三相全波 + 附加电容	较高	较高	较好～好	小	40Cr，YT15，TC4
单相全波 + 附加电容	低～较高	低～较高	较好～好	小	40Cr，TC4
脉冲方波 + 三相全波 + 附加电容	高	高	较好～好	较小	40Cr，YT15，TC4
脉冲方波 + 单相全波 + 附加电容	低～较高	较高	差～较好	大	40Cr，TC4

4.2.3　复合加工的工艺规律研究

在进行电解－电火花复合加工时，由于电解作用和电火

花作用同时存在，使影响工艺效果的因素很多，现将主要因素对工艺效果的影响介绍如下。

1）直流电压的影响　随着直流电压增大，生产率显著提高，但当直流电压增大到一定值时，不仅加工误差和表面粗糙度大，而且阴极损耗显著增加。因此，直流电压值一般控制在20V以内。

2）脉冲宽度的影响　脉冲宽度增大时，生产率显著提高，阴极损耗明显降低，但加工误差和表面粗糙度值增大；故在粗加工时脉冲宽度应取大值150～300 μs，而在精加工时应取小脉宽值4～50 μs。

3）脉间宽度的影响　当脉间宽度增大时，不同材料其影响不同，根据试验结果，综合考虑可在100～200 μs范围内选取。

4）脉冲峰值电流的影响　脉冲峰值电流与其他参数有关，在上述有关参数一定的条件下，峰值电流的变化能反映工艺指标的变化，当峰值电流增大时各项指标均有增大的趋势，故峰值电流值不宜选取太高，一般可控制在60 A以内，当加工面积增大时可适当取大。

4.2.4　加工应用的试验研究

1）深小孔加工　电解电火花复合加工深小孔，能得到良好的效果。加工直径在 ϕ1～2 mm之间，孔的深径比可达到60以上。加工速度为：硬质合金4～10 mm/min，纯钨2～4 mm/min，钛合金、不锈钢、耐热钢约为12～24 mm/min，普通碳钢15～30 mm/min，但表面粗糙度较差，R_z = 9～20 μm。

2）成形加工　将复合加工与单纯的电火花加工、电解加工进行比较试验。加工工件材料分别为40Cr和TC4；阴极材料为紫铜，外径 ϕ12 mm，内径 ϕ2 mm，其试验结果列于表4.7-15。

表4.7-15　几种加工方法的比较

加工方法		电火花加工		电解加工		复合加工	
加工参数	加工电压/V	75		直流20		脉冲75＋直流20	
	脉冲宽度/μm	128/30				128/30	
	峰值电流/A	60		电流密度80 A/cm^2		60	
	工作液	煤油		8%NaCl＋23%$NaNO_3$		复合工作液	
	工作液压力/MPa	1.5		1.5		1.5	
工艺效果	生产率/mm^3·min^{-1}	40	29.2*	105	86.4*	360	286*
	侧面最大间隙/mm	0.13	0.11*	0.32	0.3*	0.15	0.12*
	表面粗糙度 R_z/μm	22（无点蚀）	16.5*	7.9（有点蚀）	6.4*	11（无点蚀）	9.6*
	电极损耗比/%	8.7	14.5*	0	0*	1.2	1.3*

注：表中＊为40Cr钢的工艺效果。

由上述研究总结可知：电解电火花复合加工生产率高、加工精度较高、表面质量较好，但仍存在阴极损耗。产生上述结果的原因是多方面的，现综合讨论如下。

① 生产率　试验中发现复合加工的生产率高，即在平均电能相近的情况下，比单独的电火花加工高约5～8倍，比电解加工高约2倍。其主要原因是：a）能量利用率高。由于工作液有一定钝性作用，故在两极施加电压后，在阴极表面产生大量氢气的同时，还在阳极上产生保护性氧化膜和不同程度的伴随析氧现象，使两极很快被气膜或钝化膜覆盖，为放电造成有利的条件。一旦发生放电现象，阳极表面的钝化膜被破坏，这样不仅因放电而蚀除金属，而且使阳极由钝化转为活化，在很小的间隙下电流集中在该部位使能量的利用率高。b）高压诱导脉冲有效地击穿气体膜和阳极钝化膜，确保了火花放电，使加工稳定、效率提高。在试验中发现，当无高压脉冲加入时，直流电压在12 V以下均不放电；而当加入高压诱导脉冲时，极间均能可靠产生火花放电。当诱导脉冲击穿间隙之后，极间电阻降低，这时直流电压向间隙输送能量参加放电加工，从而加强了放电的蚀除速度。c）电解和放电作用互相促进，使两种功能充分发挥。由于复合工作液的电解性质，加之波形中叠加有直流，故在脉冲间歇、空脉冲和击穿延时中都会有电流通过（电压、电流波形见图4.7-25），致使产生电解作用。而在产生电解作用的同时，间隙中气体膜和钝化膜的产生又有效地达到了消电离的作用，有助于放电可靠停止和保证下次放电的进行。这样，一方面因脉冲放电去除金属的同时破坏钝化膜促进电解作用的发挥，另一方面电解作用去除金属的同时产生气体和钝化膜又为放电的稳定进行创造了良好的条件。总之，在脉冲击穿后能量利用率高、间隙状态良好，放电作用和电解作用均能处于良好工作状态，是复合加工提高生产率的主要原因。

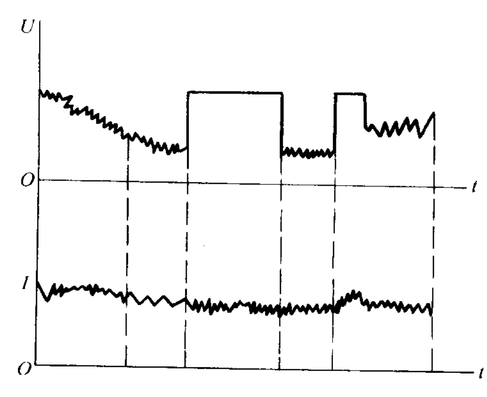


图4.7-25　复合加工时的波形

② 加工精度　电解电火花复合加工的精度比电解加工高，与电火花加工精度接近。其主要原因为：a）在加工过程中金属去除主要靠放电加工和放电去膜后的电化学加工，而且放电作用还能有效的消除短路点，故使加工间隙很小（接近电火花加工间隙值）。b）从加工产物的分析结果发现，复合加工蚀除产物的颗粒直径远比在煤油中放电加工的蚀除产物的颗粒直径小，这样在侧面“二次放电”的可能性减小。c）由于采用的工作液有钝性作用，使非加工表面和加工过的表面得到保护，从而减小了电解的杂散腐蚀作用，使

侧面间隙趋于均匀。

③ 表面质量　复合加工表面质量就粗糙度而言略大于电解加工，而比电火花加工的粗糙度要小得多（在生产率较高时）。从表面分析的结果来看，没有明显的热影响层和显微裂纹，故表面质量较好。其主要原因是：a）在复合加工中电解作用能有效地去除放电坑的凸起部分，同时也去除凹坑底部的金属，但前者去除速度要比后者快，故使表面粗糙度减小的同时，也使放电表面的不良影响得到控制。尽管如此，放电坑并不易很快完全去除，所以其粗糙度略大于电解加工。b）如前所述钝化膜对电解杂散腐蚀作用的限制，使表面麻点等缺陷几乎不存在。

④ 阴极损耗　电解电火花复合加工时，由于放电现象的存在，难免使阴极有所损耗，尽管其阴极损耗与电火花加工相比起来要小，但对生产总是不利的因素。然而，在试验中发现随着工作液中电解液浓度的适当增加和脉冲宽度的增大，阴极损耗将明显地降低（见图 4.7-26）所以合理选配工艺参数和电解液参数，可使阴极损耗降低到较小的数值。

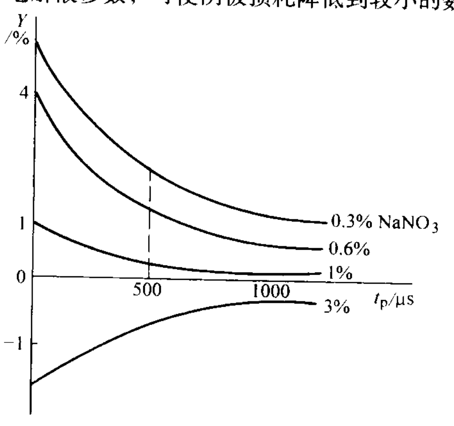


图 4.7-26　电解液浓度、脉宽与阴极相对损耗的关系

综合上述电解电火花复合加工电参数对工艺效果的影响规律的研究成果列于表 4.7-16，该表比较系统地揭示了电解电火花复合加工的共性规律。但试验还表明，对不同的工件材料在工艺参数的选择和工作液的选配上有所不同，对于具体的加工，还应该在一般规律的指导下，进行实际工艺试验以确定工艺参数的选择。例如，对 40Cr 钢，由于含有铬，故阳极表面易生成钝化膜，这正好适合复合加工，有利于放电的产生，也可在电极破膜后进行阳极溶解，故采用低浓度钝性工作液或复合工作液均能得到较好的效果。TC4 与 40Cr 所不同之处是钝化膜极易生成，而钝化膜的保护性很强，这对放电是有利的一面，但给破膜后进行阳极溶解带来困难，所以要在工作液中加入适量的 NaCl 作为活化剂，同时还要加入少量的柠檬酸钠作为络合剂，以便在阳极界面与钛离子络合，不使钛离子很快水解而生成钝化膜。如此，电解作用虽然加强，但对放电作用有所减弱，在工作液中加入 SX－1（线切割工作液）可加强放电的去除作用，同时，其中的碱性成分也有利于溶解 TC4 中的铝元素，由于多元成分的有机配合才取得良好的效果。硬质合金与上述的材料又有所不同，由于它是以 Co 为黏结剂的碳化钨（WC），故首先要解决 WC 的溶解问题。在工作液中加入 NaOH 可使 WC 所氧化生成的 WO_2 与 NaOH 结合生成 Na_2WO_4 而溶于水中，黏结剂骨架可被 $NaNO_3$ 溶解，也可被放电能量去除，当 Co 被溶解后有可能在阴极上沉积，加入适量的酒石酸钾钠可使之形成不溶性物质。

4.2.5　电解－电火花复合加工的发展及应用前景

电解－电火花复合加工目前主要存在的问题如下。

1）因为放电而导致阴极损耗的存在，目前还没有很有效的办法彻底解决。

2）由于对电解放电复合加工的机理和工艺研究不够深入，目前还未能正式应用于生产。

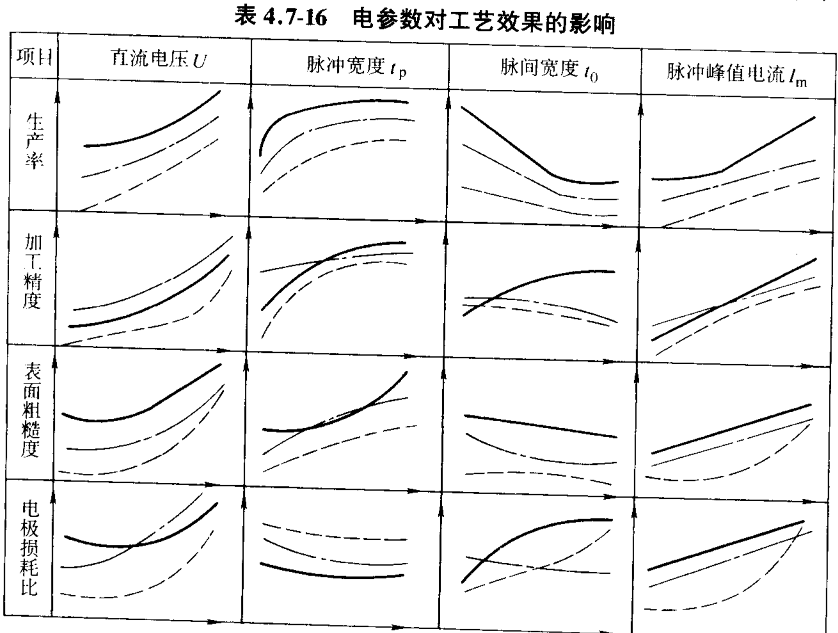
要使此项工艺在生产中得到应用，今后的研究方向如下。

1）进一步深入研究电解放电过程的机理，摸清工艺参数（含电解液参数）与电解蚀除、放电蚀除及电解－放电相互作用、复合作用的规律和定量关系，以及降低阴极损耗的有效措施。

2）研究新型复合加工工作液。在电解放电复合加工中，工作液影响很大，研究既能进行阳极溶解、又有利于创造放电条件，而且综合性能好的工作液非常必要。

3）研究大功率电解－电火花复合加工电源。此类电源要有放电的脉冲性能和电解的直流性能；要有足够击穿电压及电解电压；要能合理控制电解和放电作用；并要有瞬时释放大能量的功能，以便提高加工效率。

表 4.7-16　电参数对工艺效果的影响



注：—— TC4；—·— 40Cr；- - - -YT15



4）研究先进有效的检测技术，保证有关参数控制在规定的范围内，有利于加工的正常进行，进而研究一整套控制系统，为实现自适应控制和数字化控制创造条件。

由于现代科学技术的不断发展，新型难加工材料不断出现，在航空、航天、兵器、电子行业，出现部分结构复杂，精度和表面质量要求高，材料难加工的零件，成为生产中的技术难题。采用通常的电火花加工方法效率很低，而采用电解加工精度难于保证，电解－电火花复合加工可以取长补短，其生产率高、加工精度和表面质量较好，是一种有发展潜力、有希望解决上述工艺难题的新型加工方法。据有关资料介绍，英国、俄罗斯、美国、日本等国家也都在进行深入研究，其中复合光整加工技术已开始用于生产，精密成形加工技术正在攻坚阶段。根据其工艺特点，预计可以在同一套设备上实现高速电解电弧复合粗加工、电解电火花复合精加工、电解微放电光整加工，具有诱人的应用前景。如果再采用简单阴极（如棒状）进行加工成形运动，并由计算机控制上述粗、精、光整加工的加工过程，则此项工艺可望在生产中发挥更大的作用。

编写：徐文骥（大连理工大学）
云乃彰（南京航空航天大学）
任仲根（西北工业大学）



第 8 章 电化学加工技术的发展趋势

电化学加工技术以其突出的技术特点，从 20 世纪 60 年代初产生以来，得到不断的创新、发展和应用。例如，电解加工以其加工速度快、表面质量好、凡金属都能加工而不怕材料强、硬、韧、无宏观机械切削力、工具阴极无损耗、可用一个成型阴极作单方向送进而全型加工、成批生产复杂型腔、型面、型孔等优点，首先在炮管膛线和航空发动机涡轮叶片的加工中得到应用；其后又逐渐扩大应用于锻模型腔、深孔、小孔、长键槽、等截面叶片整体叶轮的加工以及去毛刺等领域，取得了显著的技术经济效果。在 70 年代中期以后，随着国际市场经济竞争形式的变化，产品更新换代快，生产批量减小，使得电解加工的适用范围也发生变化，总的看来应用范围有所减小，但应用要求却越来越高，由此而创新发展了脉冲电流电解加工和数控展成电解加工，在某些新的领域又得到新的发展和应用。电铸成形加工技术一直稳定应用于精密零件、模具复制加工中，而因为电化学阴极沉积能够形成微细晶粒结构，可以得到微薄、精密的电铸层，则微细电铸技术、或者说与微细电铸技术结合的微细制造技术（如 LIGA 和准 LIGA 技术）在微机电系统（MEMS）制造、纳米制造领域又发挥新的积极作用。随着现代科学技术的发展，必然对电化学加工技术提出新的需求，同时也为电化学加工技术的发展提供新的技术支持。可以预计，在未来 21 世纪初叶的 10 年、20 年内，电化学加工技术需要、也将会在以下方向得到发展。

1 基于电化学加工原理和复合加工原理而不断创新、发展新加工技术

1.1 高频、窄脉冲电流电解加工

试验研究表明，高频、窄脉冲电流的采用，在电解加工间隙中将产生特殊的物理、化学特性，使得高频、窄脉冲电流电解加工比较一般直流电解加工及低频脉冲电流电解加工，在复制精度、重复精度、表面质量、加工效率、加工过程的稳定性等方面都有显著提高，同时还展示了其在微精加工领域的应用前景。20 世纪 90 年代国外开始对高频、窄脉冲电流电解加工进行了基础实验研究，而国内在近几年来也进行了试验研究和产品试加工，已经取得显著的技术经济效果，将电解加工提高到一个新的微细、精密加工水平。在 2001 年 7 月举行的国际电加工学术会议（ISEM－ⅩⅢ）上，有关脉冲电流电解加工的论文，占电解加工论文的 50% 以上，这说明脉冲电流电解加工又成为电解加工领域新的研究热点。

高频、窄脉冲电流电解加工的发展，与现代功率半导体器件的发展密切相关。从 20 世纪 80 年代采用 GTO（可关断晶闸管，又称可关断可控硅）发展到 90 年代采用 MOSFET（金属氧化物半导体场效应晶体管，或简称功率场效应管）、IGBT（绝缘栅双极晶体管），脉冲电源斩波器的工作电流、频率和脉冲宽度，逐渐更适合电解加工要求。其主要性能参数如表 4.8-1 所示。

新型高频、窄脉宽、大电流直流脉冲电源的发展，将极大地促进脉冲电流电解加工在精密成型加工和微精加工领域的发展和应用。不仅如此，高频、窄脉冲电源还可应用到电解磨、电抛光、电镀、电铸等加工领域，对于其提高加工精度、表面质量和生产效率都有显著效果。

表 4.8-1 斩波器器件及相应工作参数

斩波器器件	工作频率数量级/kHz	脉冲宽度数量级/ms	允许工作电流/A
GTO	10^0	10^0	2 500
MOSFET	$10^2\sim10^3$	$10^{-3}\sim10^0$	2 000
IGBT	$10^0\sim10^1$	$10^{-1}\sim10^0$	3 000

1.2 高速、高压、小间隙电解加工

以北京首都航天机械公司整体叶轮等截面叶片型面套型电解加工为代表的高速、高压、小间隙电解加工工艺，不仅在今天、而且在将来，都显示了其在高精度、高效率电解加工中的积极作用。由于采用了特殊的倒置绝缘腔阴极结构和特别小的加工间隙（0.05～0.1 mm）、高电解液供液压力（2.5～3 MPa）、高电解液流速（30 m/s 以上）以及高电流密度（数百 A/cm²）等工艺措施，大大提高了叶型加工精度（±0.02～±0.05 mm）和加工速度（高达 5～9 mm/min）。如此高的加工精度和加工速度，不仅对难切削材料、就是对容易切削的 Al 合金叶轮，比较数控铣削加工，也有着很强的竞争力。可以预计，这一加工工艺，在 21 世纪，仍将得到发展和应用。

1.3 数控电解加工

计算机数控技术与电解加工技术集成所形成的数控电解加工研究方向，得到了国内外特种加工专家的认同。据资料介绍，1985 年，GE 公司与 Lehr Precision Inc 公司合作发展了五坐标数控电解加工机床及相应加工工艺。首先加工了 T700 航空发动机中钢制整体叶盘，随后又加工了为装备 F22 先进战术战斗机所研制的 GE37/YF120 发动机的钛制整体叶盘以及 F414 发动机的整体叶盘。它与五座标数控铣相比，加工时间可减少 50%～85%（对长叶片加工省时更多）；还可避免机械加工中容易产生的残余应力和变形。整体叶盘的粗加工（即在坯料开出叶间槽）、半精加工和精加工均采用数控电解成形方法，即采用成型或近成型阴极按照设定的轨迹进行数控运动而对工件进行数控电解加工。加工后不必再进行手工抛光，加工出的叶型厚度公差为±0.10 mm，型面公差为 0.10 mm。

在俄罗斯也采用机械仿型电火花与电解加工的组合加工带冠的整体叶轮，波兰、以色列也都进行过数控仿型电解加工的研究。我国也从 1980 年代开始进行数控展成电解加工技术研究，它以简单的“直线刃”阴极数控展成电解加工叶间槽，随后再以数控电解磨削精加工叶片型面，已经取得了实际应用成果，但目前还只限于加工可展直纹曲面。

电解加工与数控技术的结合，可以充分发挥两者的技术长处，同时又克服各自的不足，将大大增强其加工能力，为解决数控铣削难加工或不能加工的难题，提供一条新的优质、高效、快速响应、低成本的加工技术途径。

1.4 复合电化学加工

各种型面、型腔，特别是三维型面、型腔的光整加工是机械制造中常见的、但至今还没有找到满意解决办法的老大难问题，至今国内外还多采用手工抛光，其加工质量不够稳定、生产效率低、劳动强度大、甚至有粉尘、噪声污染环境、影响工人健康。为解决这一难题，人们一直在寻求新的

光整加工技术，其中包括电化学抛光、超声加工、磁力研磨（抛光）、渗粉电火花镜面加工等各种特种加工方法，但它们或只能抛光、不能整形；或只能加工平面、旋转面、而不能加工三维型面；或加工效率低、成本高。为了能够既高质量、又高效率、低成本地光整加工三维型腔、型面，人们一直在进行技术创新研究；近十余年来复合电化学加工展示了诱人的前景。

复合电化学加工，是指那些基于电化学阳极溶解与其他加工作用（如机械研磨、电火花加工、超声加工、磁力研磨）相复合的加工方法，由于存在两种或多种加工作用的复合、则加工作用相互促进，取长补短，增强了加工能力、扩大了加工范围，可以全面实现高质量、高效率、低成本的加工要求。电解磨料光整加工的应用成果就是典型例证，不仅高质量、高效率、低成本地实现了不锈钢板、化工反应釜内表面、模具型腔、轧辊型面的光整加工、甚至镜面加工，还实现了齿轮啮合面、轴承滚道的镜面加工，大幅度减少磨损、降低噪声，增长了使用寿命。而近几年来脉冲电流电解磨料光整加工的研究表明，由于复合了脉冲电流电解加工特性，使得其光整加工能力更强，加工效率更高，可望促进型面光整加工技术有新发展。

2 计算机控制技术将得到更高水平的应用

2.1 电化学加工过程（参数）的自动控制

电化学加工是一项综合电化学、流体力学、电磁学、机械学和自动控制等多学科交叉的制造技术。其加工过程受到多因素、多参数的影响。因此，加工过程的控制、加工参数的优选，成为提高电化学加工技术经济指标的必要保证。采用计算机控制技术，对电化学加工过程的工艺参数进行模糊逻辑控制、智能控制；建立电化学加工工艺数据库、优选工艺参数；或者最简单的对各主要参数进行单因素稳定控制；对于提高加工精度、效率和改善表面质量都有着积极作用，将继续在电化学加工中得到发展，其中模糊逻辑控制、智能控制将成为主要研究方向。

2.2 CAD/CAM技术、数字化制造技术的应用

英国R.R.公司在机匣电解加工中，采用了CAD/CAM技术设计制造阴极，使阴极设计制造周期大大缩短、且精度明显提高。英国Amchem公司生产的叶片精密电解加工机床，就具有CAD/CAM技术功能。根据叶片设计图，可以设计阴极并编制加工阴极的数控程序；在专用的数控切削机床上加工阴极并以此对叶片进行试加工；随后在三坐标测量机上进行测量并根测量数据生成修正阴极加工型面的数控加工程序，再对阴极进行修正加工；如此循环，直至稳定加工出精度合格的叶片。这是当前阴极设计制造CAD/CAM技术的典范，代表了电解加工阴极设计制造的方向。随着高频、窄脉冲电流电解加工技术的应用，加工间隙将更加减小并趋于均匀分布，这样就更有可能、或者说在足够精度的条件下，采用等间隙方法设计阴极，从而更有利于阴极设计制造CAD/CAM技术的应用与发展，这将是未来电解加工发展中应该注意的研究方向。

数字化制造，以其柔性好、响应快、质量高、成本低，正在成为先进制造技术的核心。电化学加工，包括电解加工、电铸成形、电解磨料光整加工，其加工对象多为型腔、型面，而对于复杂型腔、型面的几何构造及其在零件上的位置只有采用数字化模型（型值点数据库）才能进行精确描述，故对于其加工用的电解阴极、电铸原模的设计制造，直至加工过程，都有可能、也有必要进行数字化制造技术研究。其相关数字化制造的大致工作流程是：①依据设计的、或三坐标测量所得到的数字化模型，在计算机上对加工对象进行实物几何造型；②依据几何造型及加工间隙分布（对脉冲电流电解加工可视为等间隙分布，对电铸成形则无间隙），数字化设计电解阴极、电铸原模；③依据阴极、原模的数字化模型，选择加工方法、设计相应的加工运动轨迹、编写数控加工程序；④数控加工阴极、原模；⑤选择工艺数据库，电解（或电铸）加工；⑥三坐标测量所加工的型腔、型面，建立相应型值点数据库并与原设计的进行比较，如合格，则按步骤⑤重复加工；如不合格，则修正阴极（或原模）的数字化模型，又由步骤③开始，继而④修正加工阴极（或原模）、⑤继续加工、⑥测量，直至合格。由上述可见，应用数字化制造技术，可以达到精密、优质、高效、低成本、快速响应地加工复杂型面、型腔之目的。

2.3 提高加工设备的计算机控制水平

随着计算机控制技术的发展与扩大应用，必然在电化学加工领域得到发展和扩大应用，从而不仅整体提高电化学加工的工艺水平，还将促进数控电解加工和多工具、多工位、多型腔（多孔）电化学加工技术的发展，将大大增加电化学加工的快速制造能力。如前述英国R.R公司电解加工叶片的全自动生产线、荷兰飞利浦公司电解加工电动剃须刀静片的自动生产线、美国GE公司的五轴数控电解加工机床以及我国五轴数控展成电解加工机床及多轴联动数控系统，都是计算机控制的电解加工设备的典型代表。而日本通产省工业技术院机械技术研究所研制的全自动、连续镜面电化学－机械复合研磨设备，可以实现对不锈钢等金属薄板（宽度1.5 m、长度≤6 mm、厚度0.30～2.0 mm）的连续送进、连续镜面研磨，研磨送进速度在20～360 mm/min范围内根据工艺需要设定，研磨表面粗糙度 $R_a \leqslant 0.01\mu m$，镜面反射率达到62%。设备上按2排安置共8个由计算机控制旋转、摆动、上下位置可调的研磨头，在连续送进中对薄板表面进行电化学—机械复合研磨，从开始送进板材，经过研磨、洗净、干燥、到最后粘贴表面保护薄膜，全部工序由计算机控制在该设备上连续自动完成。如此高水平的自动控制，保证了整个研磨工艺过程的稳定可靠，高质量、高效率，显示了计算机控制技术应用于电化学加工领域的发展方向。

3 微细电化学加工技术探索

电化学加工原理，无论是阳极溶解还是阴极沉积，都是以离子状态进行。因此，从加工机理上讲，控制加工条件，选择工艺参数，在提高定域性加工能力上有新的技术突破，存在着实现以离子数量级去除、增加材料的可能性，为微细加工提供新的技术途径。

德国科学家研究以纳秒计的超短脉冲电解加工技术，成功地在纳米尺度上去除金属材料、加工了微型机械，加工精度达到几百纳米。又如电动剃须刀静片（材料为不锈钢）厚度仅为30 μm，需加工其内外型面及其上的几十个微孔、窄槽，加工厚度误差小于2 μm、而且加工的微孔、窄槽既要保证尖边又要保证无毛刺（剃须的需要!）。如何高质量、高效率、高合格率、低成本达到上述加工要求，是世界上电动剃须刀生产厂家都在力求解决而至今还未解决好的工艺难题。荷兰菲利浦公司充分运用脉冲电流电解加工的特点，创建了计算机控制的全自动电解加工剃须刀静片的生产线，这是微细电解加工不只是在实验室研究、而是在产品批量加工中得到应用的典型实例，展示了它在微细加工领域的应用前景。

电铸加工以其精密成形的特点，在微细加工领域已经发挥积极作用，得到了重要应用，如激光防伪商标模板制造，



就是典型应用实例。LIGA、准 LIGA 技术是当今重要微细制造技术，而微细电铸已成为其重要组成部分。作为纳米制造，即纳米晶粒电铸层、纳米尺度电铸成形，也已经成为微细电铸的一个新研究方向。从原理上讲，如果能够解决应力变形和孔隙等缺陷问题，电铸成形的复制精度可以达到纳米数量级。可以预计，电铸加工在微细制造领域具有广阔的发展空间。

与电铸加工相比，由于影响电解加工精度的主要因素、即电场、流场参数的多变性，还有电解加工的定域性问题、以及加工过程中所存在的杂散腐蚀、二次电解问题，都影响到电解加工在微细制造领域的发展。因此，要使电解加工在微细加工领域发挥更大的作用、得到更多的应用，需要攻克更多的技术难题，需要更多的技术集成和创新，如前面提到的高频窄脉冲电流电解加工、超短脉冲电流电解加工、电解液成分和浓度的选择等。近几年来，国内外研究人员正是按照上述技术途径进行研究，已经取得某些开拓性的研究成果。如 IBM 公司实验室采用电化学蚀刻方法制造了微细电子零件，PHILIPS 公司实验室微细电解加工了微米级浅槽，还有德国研究人员采用稀（0.2 mol/L）HCl 水溶液、超短脉冲电流在 Ni 板上电化学蚀刻了 200nm 宽、1 μm 深（脉冲参数：500 ps、200 MHz、2 V）的微窄槽以及在 5 μm 厚的 Ni 板上电化学蚀刻了 2.5 μm 宽（脉冲参数：3 ns、33 MHz、2 V）的同心螺旋通槽，螺旋弹簧片厚度约 0.6 μm。上述试验加工结果向人们展示了微细电化学加工的发展前景。

4　绿色电化学加工

为使电化学加工技术得到持续发展，也为了生产工人的健康和周围环境的安全，必须重视并解决电化学加工过程中的环境保护问题。对加工过程中逸出的气体要通风排放，特别对电化学加工的产物要进行处理和回收，化解其中某些有害离子（如 Cr^{6+}），严格按照国家有关标准规定排放。更重要的是，要加强绿色电化学加工技术的研究，如开发新的工作液，近期日本学者提出超纯水电化学加工的设想，给人们以新颖的启示；此外，还需加强电化学加工过程在线处理工作液及其中附加产物的研究，以保证在电化学加工过程中不产生或很少产生有害物质，或者在电化学加工过程中就已经在线将这些有害物质化解。这些都是电化学加工发展中必须要重视并解决的问题，以达到“绿色制造”的目的。

综观前 20 年，展望后 20 年，可以认为，电化学加工已经并将继续扩大其在机械产品加工、特别是新的难加工材料、新的复杂结构的加工中发挥独特的、无法替代的作用。在今后 20 年内，电化学加工将在新加工技术创新，设备与加工过程、参数的计算机控制，微精加工技术探索以及绿色制造等方面开展创造性研究工作，以使电化学加工技术在航空、航天、机械、电子、微机电系统等制造领域得到不断发展和应用。

编写：徐家文（南京航空航天大学）



参考文献

1 王建业，徐家文．电解加工原理及应用，北京，国防工业出版社，2001．1
2 陈延禧．电解工程．天津：天津科学技术出版社，1993
3 杨怡生等．钛合金电解加工手册．北京：国防工业出版社，1990
4 Wilson J. Practice and Theory of Electrochemical Machining
5 余承业等．特种加工新技术．北京：国防工业出版社，1995
6 刘晋春，赵家齐．特种加工．第2版．北京：机械工业出版社，1994
7 《航空制造工程手册》编委会．航空制造工程手册，特种加工．北京：航空工业出版社，1993．12
8 胡传炘，夏志东等．特种加工手册．北京：北京工业大学出版社，2001
9 杨辉，卢文庆．应用电化学．北京：科学出版社，2001
10 范植坚，王天诚．锻模电解加工若干技术问题的探讨．电加工与模具，2000（4）
11 陈远龙，朱树敏，陈心照．应用数据表进行电解加工阴极设计的新方法．电加工与模具，2001（4）
12 陈远龙，朱树敏．脉冲电流参数对电解液非线性特性及锻模电解加工的影响．电加工，1991（2）
13 陈远龙，朱树敏．模具电解加工工艺参数表和数据库的研究．电加工与模具，2001（2）
14 沈健，张海岩．锻模电解加工工具电极的反拷和修正方法．电加工与模具，2001（4）
15 薛重德．混气电解机床控制系统的研制．电加工，1996（6）
16 王建业，余艳青，韩冠军．MOSTET高频、窄脉冲电解加工工程化电源研制．2003年全国特种加工学术会议论文集，北京：2003年10月
17 美国商务部国家技术信息管理部（NTIS）国家制造科学中心．脉冲电解加工发展水平综述．1996，PB96—158621号报告
18 沈健，朱树敏，陈远龙．锻模电解加工新技术．电加工，1998（1）
19 陈远龙．锻模型腔的电解加工技术．锻压技术，1995（5）
20 陈远龙．脉冲电流电解加工技术在锻模制造中的应用．模具技术，1995（4）
21 王建业，林苏文．叶片电解加工技术的新发展．航空工艺技术，1998（6）
22 刘家富等．深小孔电解加工．航空工艺技术，1990（4）
23 王天诚．炮管混合膛线电解加工技术分析．第7届全国电加工学术年会论文集，苏州：1993．206～209
24 徐家文．整体叶轮的特种加工方法．航空精密制造技术，1992（4）
25 王建业．电解加工技术的新进展——高频窄脉冲电流电解加工．电加工，1998（2）
26 王建业等．气门锻模高频、窄脉冲电流电解加工试验研究．模具工业，2000（2）
27 Rajurkar K P, Wei B, Kozak J. Modeling and Monitoring Inter－electrode Gap in Pulse Electrochemical Machining. Annuals of CIRP, 1994, 44（1）
28 Wang J Y, et al. Investigation of MOSFET Power Characteristics in PECM Application. Proc. Of ISEM－11, 1995
29 Kozak J, et al. Analysis of Electrochemical Machining Process with Sort Pulse. The Minerals, Metals & Materials Society, 1992
30 Rybalko A V, et al. Electrochemical Machining with Micro－second Pulse. Proc. Of ISEM－11, 1995
31 Wang J Y, McGough J A, et al. Fine Compound ECM/MSM Machining Process. Proc. Of IMCC, 93, 1993
32 徐家文，云乃彰，严德荣．数控电解加工整体叶盘的研究、应用和发展．航空制造技术，2003（6）：31～34，72
33 徐家文，朱永伟，胡平旺，云乃彰，严德荣．数控电解加工整体叶轮的关键技术．宇航材料工艺，2003 VOL. 33，NO. 2：48～42
34 徐家文，唐亚新．数控展成电解加工的成形规律研究．机械工程学报，1994（6）
35 朱永伟，徐家文等．整体叶轮数控展成电解加工的数据处理及编程，中国机械工程，2002，13（16）：1385～1388
36 康敏，徐家文．精密展成电解加工整体叶轮的数控编程．机械科学与技术，2002（5）：748～750
37 朱永伟，徐家文，胡平旺．数控展成电解加工整体叶轮的研究与应用．航空学报，第22卷，第4期，2001年7月．376～378
38 干为民，徐家文，刘延禄．数控展成电解磨削整体叶轮叶片型面的研究．中国机械工程，2003 VOL. 14，NO. 1：24～26
39 干为民，徐家文．五轴联动数控展成电解磨削整体叶轮的控制方法．东南大学学报，2002 VOL. 32. NO. 2：228～231
40 Wei B and Rajurka KP Accuracy and Dynamics of 3－Dimensional Numerical Control Electrochemical Machining（NC－ECM），1990，Proceedings of the Winter Annual Meeting of the ASME，PED－Vol. 45：33～45
41 Xu J W, et al. The Investigation on the Shaping Law of NC－ECCEM（Electrochemical Contour Evolution Machining）with a rotating Cathode. 1993，Proceedings of the 6th Manufacturing Conference with China：97～100
42 宋一心．涡轮叶片的小间隙电解加工．电加工，1998（1）
43 施文轩等．电液束加工工艺的研究及其发展．航空制造技术，2001（6）
44 向显德．电化学插削技术．北京：国防工业出版社，1994
45 摘自《国外科技市场》2000（8）：48，德国科学家用电解法加工纳米机械，航空精密制造技术，2000（5）：8
46 Kock M. Kirchner V. Schuster R. Electroche. mical Micromachining with Ultroshort Voltage Pulse－a Versatile Method with Lithographical Precision. Electrochemical Acta，2003（48），3213～3219
47 陈亚．现代实用电镀技术．北京：国防工业出版社，2003
48 ［苏］Г. А. Садаков．电铸技术．陈钧武，江永安译．北京：兵器工业出版社，1992
49 ［苏］К. М. Вансовская，Г. А. Волянюк．工业电铸．



林能春，邓传玉译. 北京：兵器工业出版社，1991
50 朱获，傅琼华. 组合式电铸技术的实验研究. 航空工艺技术，1996，(1)：1～4
51 朱获，张国斌，朱择先. 微型滤网的精密电铸. 航空精密制造技术，1996，(1)：22～23
52 葛宏伟，裴敏，许蕾，张肇群. 激光模压彩虹全息图的制作原理及工艺. 华中理工大学学报，Vol，25，N4，57～59
53 吴正梁. 黄金铸造工艺－电铸技术. 中国黄金经济，2000，1：57
54 陈钧武. 电铸发展现状. 电镀与精饰，1996，3：22～25
55 吕益艳，王帮峰，吴安德，黄因慧. 发展中的电铸技术. 电加工与模具，2000，(4)：45～46
56 林春华，葛祥荣. 电刷镀技术便览. 北京：机械工业出版社，1991
57 梁志杰，魏孝信，马世宁，臧永华. 非金属刷镀技术. 北京：机械工业出版社，1996
58 梁志杰，谢凤宽. 电刷镀技术的应用与发展. 工程机械与维修，2000，11：73～74
59 徐滨士，梁秀兵，马世宁等. 实用纳米表面技术. 中国表面工程，2001，3：14
60 周锦进. 电化学机械加工轴承滚道的表面特性. 轴承，2002 (9)
61 徐文骥. 复合轨迹电解磨料加工实验研究. 电加工，1993 (4)
62 张云电. 超声加工及其应用. 北京：国防工业出版社，1995
63 任中根等. 电解放电加工基础工艺研究. 电子工艺技术，1993，(6)
64 徐家文，王建业，田继安. 21 世纪初电解加工的发展和应用，电加工与模具，2001 (6)：1～5
65 朱树敏. 电解加工的现状和发展. 第八届电加工会议论文集. 243～245
66 朱获. 国外电解加工研究进展. 电加工与模具，2000 (1)：11～16
67 陈光. 整体叶盘在国外航空发动机中的应用. 航空发动机，1999 (1)：1～6，44
68 李志广. 国外第四代歼击机发动机的特点和我们应如何发展的几点意见. 航空发动机，1996 (3)：1～8
69 Rajurkar K P，Zhu D，McGeough J A，Kozak J，De Silva A. New Development of Electrochemical Machining. Annals of CIRP，1999，48 (2)：567～579
70 Masuzawa T and Takawashi T. Recent Trends in EDM/ECM Technologies in Japan. Proceedings of the ISEM－12，1998，1～15
71 刘正埙. 我国特种加工技术的回顾与展望. 电加工，1999 (5)：6～11
72 赵万生，王振龙，郭东明，赵福令，朱获，黄因慧. 国外特种加工技术的最新进展. 电加工，1999 (5)：12～19
73 朱获. 纳米制造技术与特种加工. 2001 年中国机械工程学会年会暨第九届全国特种加工学术年会论文集：特种加工技术. 北京：机械工业出版社，2001，11：1～5